



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Integración de Métodos Geofísicos para
Caracterizar la Cimentación de un
Puente en Coatzacoalcos, Veracruz.**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Itzel Denisse de la Cruz Domínguez

DIRECTOR(A) DE TESIS

M.C. David Escobedo Zenil



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA
OFICIO/FING/DICT/0855/2019

SRITA. ITZEL DENISSE DE LA CRUZ DOMÍNGUEZ

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento que la opción de titulación: **POR TESIS**, así como el tema y contenido propuestos por el **M.C. David Escobedo Zenil** en calidad de **Director de Tesis**, han sido aprobados por el comité de titulación de la carrera de **Ingeniería Geofísica** y se muestran a continuación

INTEGRACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA CARACTERIZAR LA CIMENTACIÓN DE UN PUENTE EN COATZACOALCOS, VERACRUZ.

| | |
|-----|--------------------------------------|
| | RESUMEN |
| | ABSTRACT |
| I | INTRODUCCIÓN |
| II | GENERALIDADES DEL PROYECTO |
| III | DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS |
| IV | METODOLOGÍA |
| V | ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS |
| VI | INTEGRACIÓN DE RESULTADOS |
| | CONCLUSIONES |

Por otra parte, le comunico que le ha sido asignado el siguiente jurado que tendrá como función básica, avalar su trabajo escrito y autorizar la réplica oral requerida para la obtención del título profesional, de acuerdo al Reglamento de Opciones de Titulación vigente.

| | |
|-----------------------|------------------------------------|
| PRESIDENTE: | M.I. JAVIER LERMO SAMANIEGO |
| VOCAL: | M.C. DAVID ESCOBEDO ZENIL |
| SECRETARIO: | DR. GERARDO CIFUENTES NAVA |
| 1ER. SUPLENTE: | DR. MARTÍN CÁRDENAS SOTO |
| 2DO. SUPLENTE: | DR. ANTONIO URIBE CARBAJAL |

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de Administración Escolar, en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar del trabajo escrito, el título de este.

Asimismo, le recuerdo que para optar por el título profesional, es necesario haber acreditado el 100% de los créditos establecidos en el plan de estudios, haber realizado el Servicio Social de acuerdo con la Legislación Universitaria y haber aprobado el examen de comprensión de lectura de un idioma extranjero, en términos de lo dispuesto por el Consejo Técnico.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria, Cd. Mx., 09 de septiembre 2019.

El Presidente del Comité de Titulación de Ingeniería Geofísica


DR. ENRIQUE ALEJANDRO GÓNZALEZ TORRES

ccp Coordinador de la Carrera

Detrás de lo que creemos conocer de sobra se esconde una cantidad equivalente de desconocimiento. La comprensión no es más que un conjunto de equívocos.

Haruki Murakami

Agradecimientos

A mi madre Irma del C. Domínguez, por ser mi mayor motivo y por estar siempre a mi lado en los momentos felices y también en los tristes. Te agradezco por creer siempre en mí y por cuidarme con tanto amor y tanta paciencia.

A mi padre, Jesús de la Cruz por ser mi mayor inspiración y por empujarme a siempre mejorar. Te agradezco por todo el apoyo que me brindas y por aceptarme siempre como soy, con mis locuras y ocurrencias.

A mis hermanas, Lulú y Lupita por estar siempre a mi lado como mis cómplices, por apoyar mis sueños y ser mis mejores amigas, ustedes son un pilar muy importante en mi vida.

A Víctor y a Zaid, por ser mis niños y mi motivo para superarme, espero poder apoyarlos en todas sus metas a futuro.

A mi abuelita Gene y mi abuelito Jesús, por ser mi ejemplo de bondad y amor infinito, gracias por todas sus enseñanzas.

A mi abuelito Gelito, mi abuelita Chepita, mi tío Benito y mi tío Paco, gracias por creer en mí el tiempo que estuvieron en mi vida.

A mis amigos Alfonso, Saúl, Carmen, Mauricio, Aarón, Andrés, Jorge, Fabián y Rubén por hacer de la universidad la etapa más hermosa y divertida de todas. A Fanny y a Mimí por ser mis mejores amigas, porque a pesar de las circunstancias nuestra amistad ha prevalecido y se ha convertido en hermandad.

A la empresa Sergben Ingeniería del Subsuelo, S.A de C.V dirigida por el Ing. Sergio Benigno Paredes, por haberme dirigido y proporcionado los datos que en esta tesis fueron utilizados, no tengo palabras para agradecer su tiempo, paciencia y ayuda. Gracias por guiarme y hacer que este trabajo fuera posible.

A mi director de tesis, el M.C. David Escobedo Zenil por haber colaborado en la dirección de este trabajo, gracias por sus comentarios y sus enseñanzas.

Agradezco a mis sinodales, el M.I Javier Lermo Samaniego, M.C David Escobedo Zenil, Dr. Gerardo Cifuentes Nava y al Dr. Antonio Uribe Carbajal por la revisión de este trabajo y por sus valiosas aportaciones.

A Dios, por estar siempre conmigo.

Contenido

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Lista de figuras y tablas | 6 |
| Resumen..... | 12 |
| Abstract | 13 |
| 1. Introducción | 14 |
| 2. Generalidades del proyecto | 16 |
| 2.1 Ubicación..... | 16 |
| 2.2 Marco Geológico | 17 |
| 2.2.1 Fisiografía | 17 |
| 2.2.2 Geología Local | 17 |
| 2.3 Marco Geotécnico..... | 18 |
| 2.3.1 Estratigrafía y propiedades de los suelos..... | 18 |
| 3. Propuesta de exploración geofísica | 20 |
| 4. Descripción de los métodos | 23 |
| 4.1 Método de Georadar (GPR; Ground Penetrating Radar)..... | 23 |
| 4.1.1 Fundamentos teóricos | 23 |
| 4.1.2 Propiedades electromagnéticas de la materia | 25 |
| 4.1.3 Principio de operación del GPR..... | 27 |
| 4.2 Método de Ultrasonido..... | 32 |
| 4.2.1 Fundamentos teóricos | 32 |
| 4.2.2 Principio de operación del ultrasonido | 33 |
| 4.3 Método PIT (Pile Integrity Test) | 40 |
| 4.3.1 Fundamentos teóricos | 40 |
| 4.3.2 Principio de operación del PIT | 41 |
| 4.4. Método Sísmica de Reflexión..... | 45 |
| 4.4.1 Fundamentos teóricos | 46 |
| 4.4.2 Principio de operación del método de Sísmica de Reflexión aplicado a pilas, pilotes y/o estructuras de concreto. | 49 |
| 5. Adquisición y procesamiento de datos | 54 |
| 5.1 Campaña de exploración..... | 54 |
| 5.2 Georadar (GPR; Ground Penetrating Radar)..... | 55 |
| 5.2.1 Adquisición de datos de GPR | 55 |

| | |
|------------------------------------------------|-----|
| 5.3 Ultrasonido..... | 62 |
| 5.3.1 Adquisición de datos de ultrasonido..... | 62 |
| 5.4 PIT (Pile Integrity Test) | 63 |
| 5.4.1 Adquisición de datos de PIT | 63 |
| 5.2.2 Procesamiento de datos de PIT..... | 65 |
| 5.4 Sísmica de Reflexión..... | 67 |
| 5.4.1 Adquisición..... | 67 |
| 5.4.2 Procesamiento de datos | 69 |
| 6. Integración de Resultados..... | 72 |
| 6.1 Apoyo 1 | 72 |
| 6.2 Apoyo 2A..... | 76 |
| 6.3 Apoyo 2B | 80 |
| 6.4 Apoyo 3 | 84 |
| 7. Conclusiones y Recomendaciones | 89 |
| Referencias..... | 93 |
| ANEXO A..... | 96 |
| Ultrasonido, PIT y Sísmica de Reflexión. | 96 |
| ANEXO B..... | 104 |
| Radargramas | 104 |

Lista de figuras y tablas

Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Sondeos realizados en las Petroquímicas Cangrejera y Morelos que muestran el perfil estratigráfico típico de la zona. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V, 2004).

Figura 3. Esquema que muestra el orden de ejecución de los métodos geofísicos en este estudio. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Línea de georadar realizada en un estacionamiento subterráneo de la Ciudad de México, obsérvese en general en comportamiento del radargrama mostrando la ubicación de las losas, contratrabes (CT) y pilotes. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V, 2010).

Figura 5. Aquí se puede apreciar el detalle del comportamiento de la señal de georadar y la respuesta en la condición de la interacción de losas, contratrabes y pilotes. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V, 2010).

Figura 6. Gráfica de la permitividad relativa dieléctrica vs velocidad. La permitividad dieléctrica relativa es inversa a la velocidad de viaje del radar. Fuente: (Reynolds, 2011).

Figura 7. Principio de funcionamiento del GPR Fuente: Modificado de (RAMAC GroundVision, 2009).

Figura 8. Diagrama simplificado de los componentes de un equipo de radar. Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Antenas blindadas de 100, 250, 500 y 800 MHz de la marca MALA. Fuente: (Geoelec, 2017).

Figura 10. Diagrama esquemático del circuito del método ultrasonido Fuente: Modificado de (Malhotra & Carino, 2004).

Figura 11. Tres posibles configuraciones en las que pueden ser dispuestos los transductores. transmisión directa, indirecta y de superficie. Fuente: Modificado de (Malhotra & Carino, 2004).

Figura 12. Relación entre la velocidad V_p y la resistencia a la compresión en función de la variación del agregado. Fuente: (Romero, 2016).

Figura 13. En las gráficas se observa la relación existente entre la edad del hormigón a los a) 7 días, b) 14 días, c) 21 días y d) 28 días y la velocidad de onda. Fuente: (Pile Echo Tester, PET, n.d.).

Figura 14. Propagación de onda en una barra elástica. Fuente: Modificado de (User Manual PET, 2013).

Figura 15. Una barra con una discontinuidad. Fuente: Modificado de (User Manual PET, 2013).

Figura 15. Los componentes de la prueba de PIT son: sistema de adquisición, almacenamiento y procesado (compatible con cualquier computadora portátil, martillo de mano y acelerómetro), y la gráfica obtenida es llamada reflectograma. Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Tipos de onda y su propagación en el medio. Fuente: Modificado de (Martínez Gutiérrez & Weppen, 2005).

Figura 17. Onda reflejada desde una sola interfaz. Velocidad constante entre la fuente y la superficie reflectante. Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Sistema de reflexión sísmica para en ensayo en pilas y pilotes. Fuente: (Romero, 2016).

Figura 19. Registro típico de la respuesta de un ensayo de sísmica de reflexión en una pila sana en el dominio del tiempo. Fuente: Modificado de (Hertlein & Davis, 2007).

Figura 20. Ensayo de sísmica de reflexión sobre uno de los apoyos del puente Teapa 2. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

Figura 21. Metodología propuesta para medir la velocidad de la onda directa a partir de la distancia entre geófonos y el tiempo de arribo. Fuente: (Romero, 2016).

Figura 22. Sismograma obtenido mediante la Sísmica de Reflexión, donde se observa la reflexión producida por la onda directa y la base de la pila. Fuente: (Romero, 2016).

Figura 23. Propuesta inicial de exploración geofísica para cada uno de los apoyos del puente. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

Figura 24. Adquisición de datos sobre un apoyo del puente mediante el equipo de georadar MALA Ramac X3M. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

Figura 25. Parámetros de ajuste iniciales en GPR. Fuente: Ramac GroundVision 1.4.2, 2011. (Ramac Groundvision, 2011).

Figura 26. Croquis de exploración con GPR e información de las líneas realizadas. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 27. Ajuste de la señal correspondiente al primer arribo de la onda en una de las trazas. Fuente: (Ramac Groundvision, 2011).

Figura 28. Filtro Time Varying Gain que permite compensar la amplitud perdida de la señal por la atenuación. Fuente: (Ramac Groundvision, 2011).

Figura 29. Ventana de aplicación de filtro pasa bandas dónde es posible especificar el método de filtrado y las frecuencias de corte. Fuente: (Ramac Groundvision, 2011).

Figura 30. Filtro automático de control de ganancia. Fuente: (Ramac Groundvision, 2011).

Figura 31. Equipo empleado en la medición de las velocidades de onda P con ultrasonido. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

Figura 32. Realización de pruebas PIT sobre uno de los apoyos del puente. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

Figura 33. Croquis de exploración con Ultrasonido y PIT e información de las líneas realizadas. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 34. Elementos que conforman a un reflectograma típico del proyecto y su procesamiento en el software de PET. Fuente: Modificada de (Pile Echo Tester, PET, n.d.).

Figura 35. Croquis de exploración con las líneas de sísmica de Reflexión Fuente: Elaboración Propia.

Figura 36. Tendido 1 de sísmica de reflexión sobre el Apoyo 1 del puente; se observa uno de los puntos de impacto, los doce geófonos y la separación entre ellos (0.75 m) Fuente: Elaboración Propia.

Figura 37. Ventana del software Tom Time, GeoTom LLC donde es posible observar cada una de las herramientas que nos proporciona el programa para el procesado de sismogramas. Fuente: (Tom Time, 2010).

Figura 38. Análisis en los geófonos 10, 11 y 12, del Apoyo 1, Tendido 1, Tiro 1 y cálculo de V_p y la longitud de la estructura de cimentación. Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. Radargrama correspondiente a la línea A1 L2 del Apoyo 1. Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Registro obtenido de la prueba PIT del punto A1_P1 que corresponde al Apoyo 1 del puente. Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Radargrama correspondiente a la línea A2A L2 del Apoyo 2A. Fuente: Elaboración propia.

Figura 42. Registro obtenido de la prueba PIT del punto A2A_P22 que corresponde al Apoyo 2A del puente. Fuente: Elaboración propia.

Figura 43. Radargrama de la línea A 2B L1, que forma parte del apoyo central. Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Registro obtenido de la prueba PIT del punto A2B_P42 que corresponde al Apoyo 2B del puente. Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Radargrama correspondiente a la línea A3 L2 del Apoyo 3. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 46. Registro obtenido de la prueba PIT del punto A3_P52 que corresponde al Apoyo 1 del puente. Fuente: Elaboración propia.

Figura 47. Caracterización final de la cimentación del Puente Teapa 2. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

Figura 48. Sondeos realizados en las Petroquímicas Cangrejera y Morelos que muestran el perfil estratigráfico típico de la zona, en el orden de los 12 a 15 m de profundidad es posible ver un cambio de litología a una arena fina arcillosa. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V, 2004)

Tabla 1. Permittividades dieléctricas relativas y velocidades típicas de algunos materiales comunes. Fuente: Modificada de (RAMAC GroundVision, 2009).

Tabla 2. Clasificación del concreto en función de la velocidad de onda P, para concretos de 200 kg/cm^2 , su valor de velocidad puede ser cercano a los 3940 m/s. Fuente: Modificado de (Malhotra V. , 1985).

Tabla 3. Casos de reflectogramas típicos asociados a pilas. Fuente: Modificado de (User Manual PET, 2013).

Tabla 4. Datos determinados a partir de los tiempos de arribo para los geófonos 10, 11,12. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Valores determinados a través del análisis de resultados del método de Ultrasonido y PIT para el Apoyo 1. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6. Resultado de la sísmica de reflexión para Apoyo 1. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Valores determinados a través del análisis de resultados del método de Ultrasonido y PIT para el Apoyo 2A. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8. Resultados de la sísmica de reflexión para Apoyo 2A. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Valores determinados a través del análisis de resultados del método de Ultrasonido y PIT para el Apoyo 2B. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 10. Resultados de la sísmica de reflexión para Apoyo 2B. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Valores determinados a través del análisis de resultados del método de Ultrasonido y PIT para el Apoyo 3. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 12. Resultados de la sísmica de reflexión para el Apoyo 3. Fuente: Elaboración propia.

Resumen

En la zona de los complejos petroquímicos de Cangrejera y Morelos, en Coatzacoalcos, Veracruz, se llevó a cabo la construcción de una nueva planta petroquímica, lo cual incentivó el constante transporte de materiales y equipos sofisticados de gran peso que formarían parte de dicha obra civil e industrial.

Uno de los accesos principales a los complejos petroquímicos es un puente y resultaba de vital importancia establecer si dicha estructura soportaría el paso de un equipo de aproximadamente 1000 toneladas. Cabe mencionar que no se contaba con información alguna sobre las características constructivas de dicho puente y mucho menos del tipo de cimentación que presentaba.

Con el objetivo de caracterizar la geometría de la cimentación del puente, se realizó un estudio geofísico con datos proporcionados por la empresa Sergben Ingeniería del Subsuelo S.A. de C.V., en donde se aplicaron varias técnicas en conjunto; GPR (Ground Penetrating Radar), PIT (Pile Integrity Test), Ultrasonido y Sísmica de Reflexión. Mediante la aplicación de dichas técnicas se confirmó que la cimentación del puente no estaba conformada por pilas o pilotes, sino de una gran zapata monolítica de unos 14 a 15 m de profundidad.

En este trabajo se da una relación documentada de la aplicación de las técnicas geofísicas que fueron adaptadas para determinar las características estructurales y de calidad del material del puente mencionado. Se refieren tanto la adquisición como el procesado de los datos geofísicos, a partir de los cuales se realizó una integración de información y resultados para definir el tipo de cimentación del puente y con ello se dio información estratégica para el traslado del equipo de gran magnitud y peso.

Abstract

In the petrochemical complexes zone of Cangrejera and Morelos, in Coatzacoalcos, Veracruz, the building of the new petrochemical plant took place, this encouraged a constant hauling of materials and sophisticated heavy weight equipment, that would be part of the work.

One of the main accesses to the petrochemical complex is a bridge and it was of vital importance to establish if the structure would be able to resist the load of equipment of approximately 1000 tons.

It should be mentioned that there was no information found on the construction characteristics of the bridge or the type of foundation that it presents.

With the purpose of characterizing of the bridge`s foundation, a geophysical study was made with data provided by Sergben Ingeniería del Subsuelo S.A. de C.V., where several techniques are applied together: GPR (Ground Penetrating Radar), PIT (Pile Integrity Test), Ultrasonic Tester and reflection seismic.

Documentation was then established for each of the geophysical techniques that were adapted for the study`s purpose, in both, acquisition and processing, it was possible to define the bridge`s foundation type, knowing this, the necessary measures were taken for the transfer of big and heavy equipment.

1. Introducción

La aplicación de métodos geofísicos para la resolución de problemas se ha extendido en muchas áreas, desde la Geohidrología hasta la Arqueología. La Geotecnia no ha sido la excepción, ya que por medio de dichos métodos geofísicos se ha logrado caracterizar parámetros físicos, mecánicos y dinámicos del subsuelo a diferentes profundidades; se ha logrado determinar la ubicación de cavidades, contactos de fracturas, discontinuidades, presencia de agua. También se ha logrado determinar la calidad del concreto en proyectos de construcción de obras civiles o en su evaluación a partir de algún evento presente, que pueda poner en riesgo la estabilidad de la estructura o en condiciones extremas de incluso de vidas humanas.

El presente trabajo muestra un conjunto de métodos geofísicos aplicados con el fin de determinar el tipo de cimentación, la calidad del concreto y otras propiedades físicas de los materiales relacionadas con las características constructivas de interés, para un puente vehicular que funge como acceso principal a los complejos petroquímicos de Cangrejera, Morelos y el puerto de Pajaritos y que conecta con la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz.

Para la evaluación de la cimentación del puente se propusieron aplicar métodos geofísicos, tales como:

- GPR (Ground Penetrating Radar; Radar de Penetración Terrestre); que es un método electromagnético basado en la teoría de propagación de una onda electromagnética que viaja a través del medio, permitiendo obtener información acerca de posibles variaciones en las propiedades electromagnéticas asociadas a heterogeneidades o presencia de distintos materiales;
- Método PIT (Pile Integrity Test; Prueba de Integridad de Pilotes) que es muy utilizado en la industria actual de cimentaciones profundas, esta prueba no destructiva se realiza con un pequeño martillo y un acelerómetro colocado en la superficie, esto para poder establecer si existen pilas o pilotes soportando a la estructura (de manera cualitativa);

- Método de la prueba de ultrasonido en el concreto, que nos permite conocer la velocidad con la que viaja una onda, parámetro que a su vez está relacionado con la calidad del concreto.
- Método de sísmica de reflexión, que nos ayuda a definir la longitud de la pila y/o pilote, así como la calidad del concreto de dicho elemento.

Todo esto con la finalidad de dar la información a los especialistas estructurales acerca de la cimentación, para que ellos pudiesen determinar si dicho puente soportaría el traslado de un equipo de magnitudes y peso muy grandes a través de este, sin colapsarse.

2. Generalidades del proyecto

2.1 Ubicación

El estudio se realizó en la ciudad de Coatzacoalcos, ubicada en la desembocadura del río del mismo nombre, en el extremo sur del estado de Veracruz y a 302 km de la ciudad de Salina Cruz, Oaxaca, en el extremo norte del corredor transísmico.

El puente de interés se encuentra en la zona de los complejos petroquímicos de Cangrejera, Morelos y el puerto de Pajaritos, sobre la carretera Allende (Figura 1).

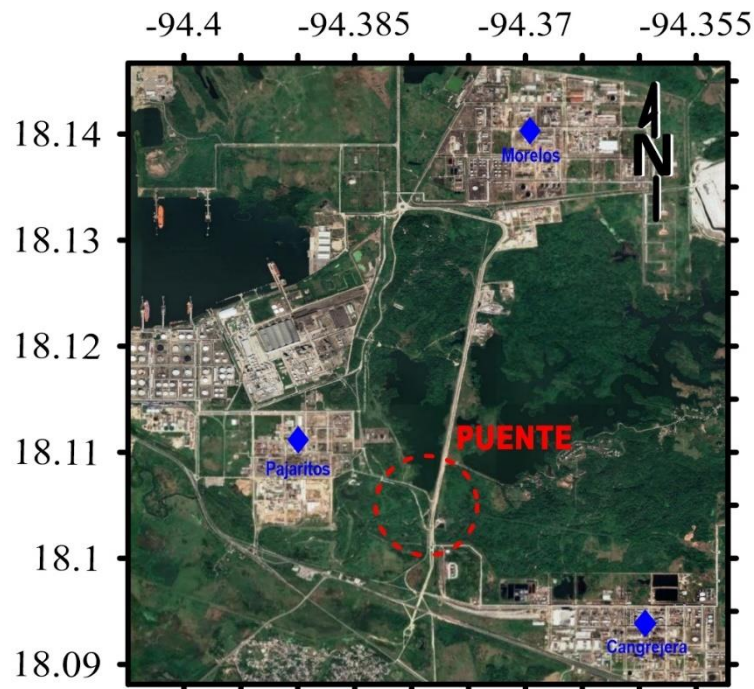


Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Marco Geológico

2.2.1 Fisiografía

El estado de Veracruz abarca áreas que corresponden a cinco provincias o regiones fisiográficas del país: la llanura costera del Golfo Norte, Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur y Llanura Costera del Golfo Sur, que están dispuestas en forma paralela al Golfo de México y quedan interrumpidas por el Eje Neovolcánico y la Sierra de los Tuxtlas (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

La zona de estudio se encuentra en Coatzacoalcos, que pertenece a la Provincia de la Llanura Costera del Golfo Sur. Esta provincia, a diferencia de la del Golfo Norte, es una llanura costera de gran depósito de aluvión originado por parte de los ríos más caudalosos del país tales como el Papaloapan y el Coatzacoalcos; la mayor parte de su superficie, con excepción de la región de los Tuxtlas, está muy próxima al nivel del mar y cubierta de material aluvial.

2.2.2 Geología Local

En la zona de estudio se distribuye de manera irregular una secuencia litológica que comprende rocas que varían en edad desde el Jurásico a la actualidad, con un predominio claro de formaciones Terciarias y escasos afloramientos de rocas calcáreas de edad Jurásica.

Se dice que los afloramientos de estas rocas se encuentran distribuidos irregularmente debido a la complejidad tectónica de la región, la cual se ve acrecentada por la acción diapírica de las estructuras salinas de la edad PreJurásica. Estratigráficamente las rocas más antiguas corresponden a la Formación Chinameca, que consiste en una sucesión de calizas arcillosas intercaladas con lutitas calcáreas de edad Jurásico Superior. La formación Chinameca se encuentra sobreyaciendo discordantemente por la Formación La Laja de edad Terciario Inferior.

Esta formación está compuesta por una secuencia de areniscas cuarzosas, lutitas y conglomerados de la Formación Filisola del Terciario Medio.

Según (Consejo de Recursos Minerales, 1994) el Terciario Superior está representado por basaltos de olivino y material piroclástico, que aflora al norponiente, en los límites con el macizo de los Tuxtlas.

El Reciente está representado por arcillas de color negro y pardo amarillento, con escasos clásticos de grano fino y ocasionalmente con fragmentos de materia orgánica (Consejo de Recursos Minerales, 1994). En esta área se encuentra un importante distrito minero activo llamado Distrito Jaltipán; la producción minera del distrito se limita a 3 sustancias: azufre, arena sílica y sal.

2.3 Marco Geotécnico

2.3.1 Estratigrafía y propiedades de los suelos

El subsuelo está constituido en su mayoría por depósitos recientes, arcillas y arenas de consistencia blanda o compacidad suelta, con espesores del orden de 30 m (Figura 2). Conforme aumenta la profundidad, se encuentran suelos formados en el Mioceno medio y superior, de arena y arcilla de compacidad densa y consistencia dura respectivamente. Esto conforma la estratigrafía descrita por (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1988) para la zona de estudio, se presenta a continuación:

Estrato I: Arena limosa de color gris y compacidad de muy suelta a suelta (SM), con un espesor variable de 1 a 3 m., contenido de agua de 20 a 30%, peso volumétrico de $1.8 T/m^3$ y un ángulo de fricción interna de 30 grados.

Estrato II: Arcilla inorgánica poco arenosa de media a alta plasticidad de consistencia blanda a media y color gris verdoso (CH- CL), su espesor es del orden de 12 m., el contenido de agua varía de 40 a 60%, peso volumétrico de $1.7 T/m^3$ y una resistencia al corte de 1.5 a $3.0 T/m^2$.

Estrato III: Finalmente desde los 12 m hasta los 25 m de profundidad se identificó una arena fina arcillosa con gravas color café claro, con una compacidad media a muy densa, el contenido de agua varía de 10 a 40%, el peso volumétrico es de $1.9 T/m^3$ y el ángulo de fricción interna es de 32 grados.

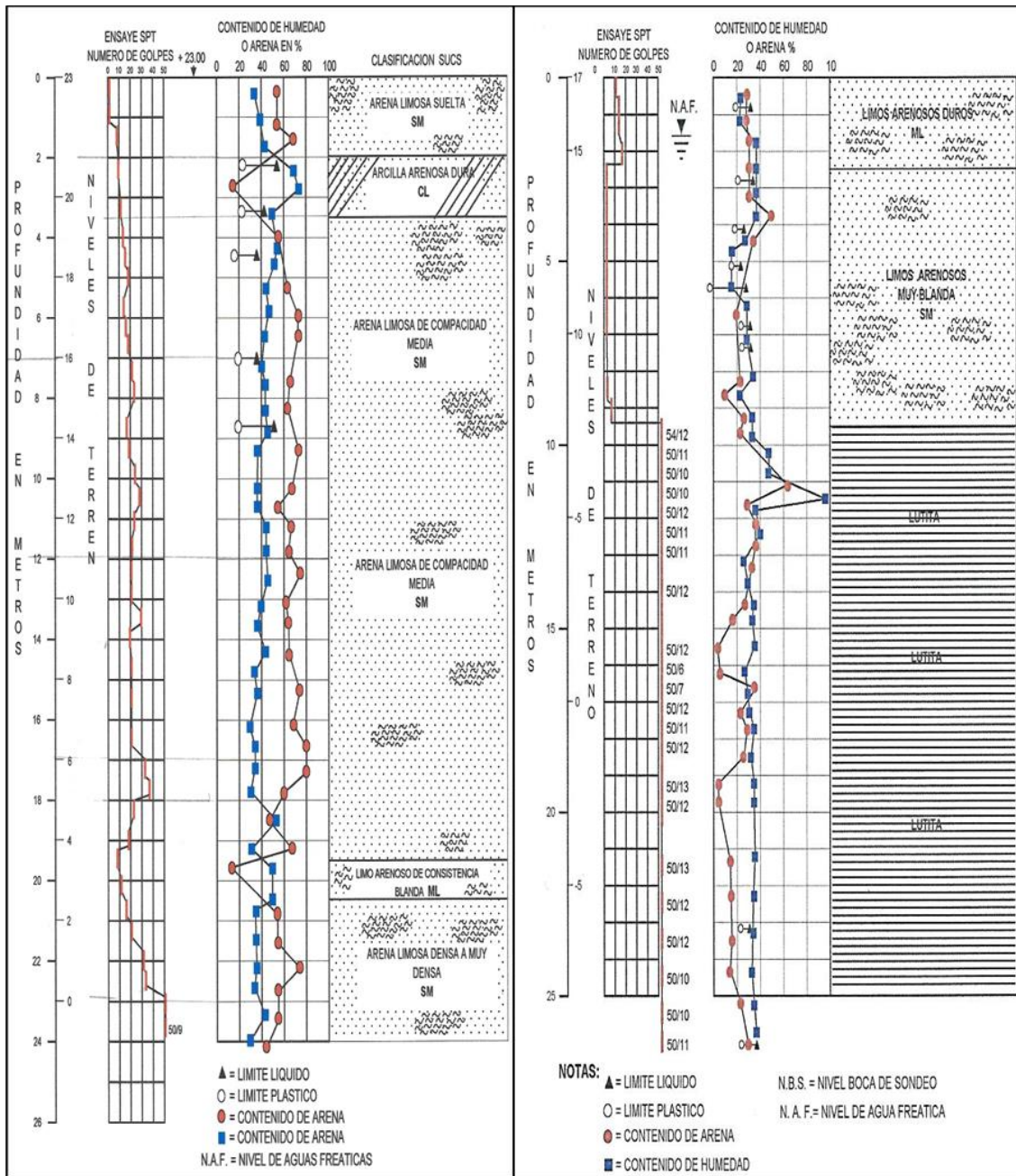


Figura 2. Sondeos realizados en las Petroquímicas Cangrejera y Morelos que muestran el perfil estratigráfico típico de la zona. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V, 2004)

3. Propuesta de exploración geofísica

Por medio de la aplicación de distintas técnicas geofísicas se busca comprobar la hipótesis de que el puente existente presenta una cimentación profunda con pilotes en sus apoyos, así como caracterizar su geometría y profundidad; para que posteriormente los encargados de la ingeniería estructural puedan determinar si el puente es capaz de resistir la carga de un equipo de aproximadamente 1000 toneladas.

El orden de ejecución de los métodos a emplear fue fundamental, ya que, de los resultados del primer método realizado, dependería el planteamiento del segundo y así sucesivamente.

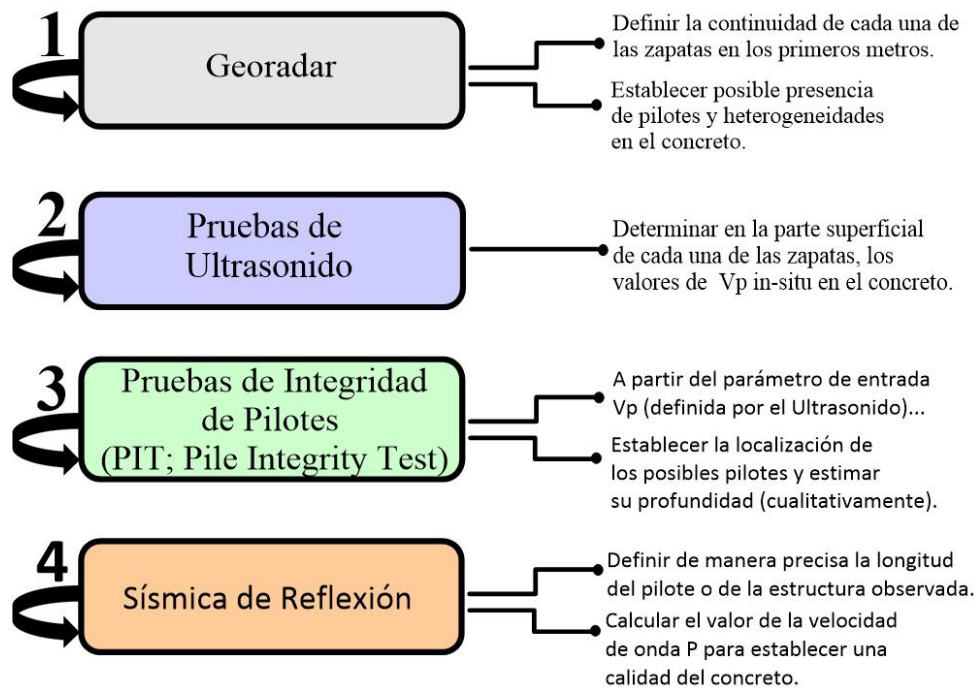


Figura 3. Esquema que muestra el orden de ejecución de los métodos geofísicos en este estudio. Fuente: Elaboración propia.

Se inició con el método de georadar (GPR), bajo el siguiente esquema (Figura 3):

Con base a estudios previos realizados por la empresa Sergben Ingeniería del Subsuelo S.A. de C.V., en proyectos que tuvieron como objetivo la localización de la interacción de una cimentación con sus apoyos y/o posibles pilas/pilotes en radargramas, fue posible tener una experiencia previa de la respuesta típica a esperar de este tipo de configuraciones en la

cimentación de estructuras civiles. En la Figura 4 y Figura 5 se muestra una línea de georadar realizada en un estacionamiento de la Ciudad de México (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V, 2010) y en dónde es posible observar la ubicación de elementos como losas, contratrabes y por supuesto, la presencia de pilotes a cierta profundidad.

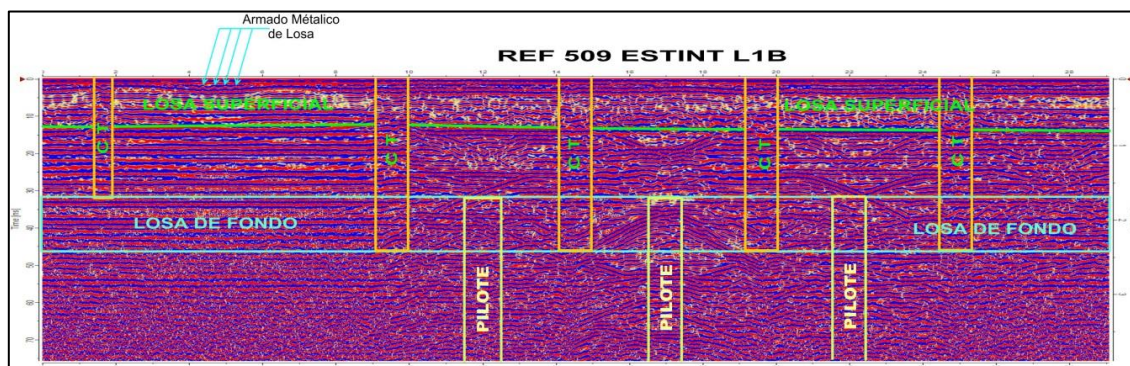


Figura 4. Línea de georadar realizada en un estacionamiento subterráneo de la Ciudad de México, obsérvese en general en comportamiento del radargrama mostrando la ubicación de las losas, contratrabes (CT) y pilotes. Fuente y cortesía: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V, 2010).

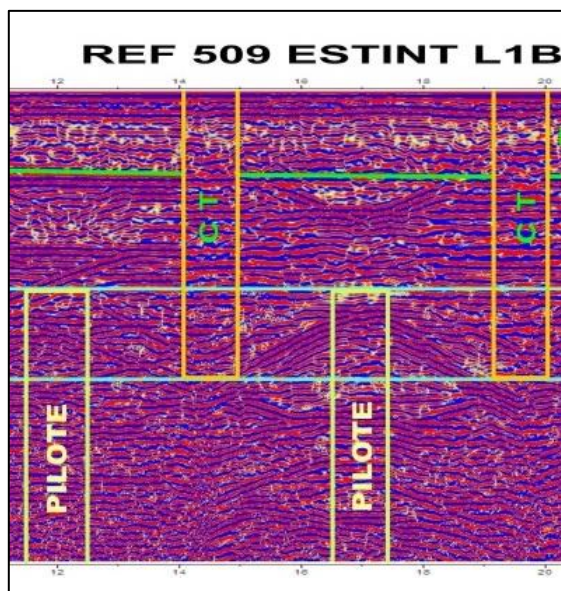


Figura 5. Es posible apreciar el detalle del comportamiento de la señal de georadar y la respuesta en la condición de la interacción de losas contratrabes y pilotes. Fuente y cortesía: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V, 2010).

Se consideró entonces que de existir pilotes en la cimentación de los apoyos del puente Teapa 2 en Coatzacoalcos, el comportamiento de la señal en los radargramas obtenidos sería muy similar a los radargramas mostrados anteriormente.

Si resultaba posible obtener algún tipo de información similar con el georadar, se procedería a ubicar la posición de los pilotes usando el método de PIT (Pile Integrity Test) y el de ultrasonido, con la finalidad de definir la velocidad de onda P en el concreto y así poder establecer de forma cualitativa la profundidad de los posibles pilotes bajo cada uno de los apoyos del puente. Ya teniendo ubicada la posición de los pilotes y un primer dato cualitativo de la longitud del pilote, se procedería a hacer la prueba con Sísmica de Reflexión para conocer de manera precisa la longitud del pilote y velocidad de onda P a lo largo de dicho elemento, y de esta manera hacer sistemática la exploración en los apoyos del puente.

El procedimiento mencionado anteriormente fue seguido con fidelidad al momento de realizar el trabajo de campo, pero los resultados que arrojaron fueron totalmente diferentes a los esperados, como se verá en los capítulos siguientes.

4. Descripción de los métodos

4.1 Método de Georadar (GPR; Ground Penetrating Radar)

4.1.1 Fundamentos teóricos

Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell representan los fundamentos de la electricidad y el magnetismo. James Clerk Maxwell (1831-1879) se encargó de reunir el trabajo de numerosos investigadores, logrando sintetizar los conceptos de campo electromagnético (unificación del campo eléctrico y el campo magnético) y corrientes de desplazamiento; algunos autores como (M. Jol, 2009) expresan de forma matemática las cuatro ecuaciones fundamentales de tal manera:

Ley de Faraday

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

Ley de Ampere

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.2)$$

Ley de Gauss para flujo eléctrico

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (1.3)$$

Ley de Gauss para flujo magnético

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.4)$$

Dónde \vec{E} es el vector de intensidad de campo eléctrico (V/m); q es la densidad de carga eléctrica (C/m^3); \vec{B} es el vector de densidad de flujo magnético (T); \vec{J} es el vector de densidad de corriente eléctrica (A/m^2); \vec{D} es el vector de desplazamiento eléctrico (C/m^2); t es el tiempo (s) y \vec{H} es la intensidad del campo magnético (A/m) (M. Jol, 2009).

Primera ley de Maxwell o Ley de Faraday:

La ecuación 1.1 establece que a partir de un campo magnético variable en el tiempo es posible producir también un campo eléctrico variable y en consecuencia generar una corriente eléctrica; el signo negativo de la ecuación es debido a que la corriente eléctrica generada tiene sentido contrario al flujo magnético.

Segunda ley de Maxwell o Ley de Ampere:

La ecuación 1.2 establece que el campo magnético es generado a partir de corrientes de conducción y corrientes de desplazamiento variables en el tiempo.

Tercera ley de Maxwell o Ley de Gauss para flujo eléctrico:

La ecuación 1.3 establece que el flujo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta q contenida en interior de la superficie.

Cuarta ley de Maxwell o Ley de Gauss para campo magnético:

La ecuación 1.4 establece la inexistencia de un monopolo magnético, es decir, expresa la no existencia de cargas magnéticas puntuales o aisladas.

Relaciones constitutivas

Cuando un campo electromagnético viaja a través de un medio, dicho medio tiene propiedades intrínsecas que definen el comportamiento del campo.

Las relaciones constitutivas manifiestan la dependencia del comportamiento de los campos con las propiedades eléctricas y magnéticas particulares del entorno de propagación:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (1.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.7)$$

Donde σ es la conductividad eléctrica del medio, μ es la permeabilidad o constante magnética absoluta y ε es la permitividad o constante dieléctrica absoluta.

σ , μ y ε son tensores que dependen entre sí, dando lugar a relaciones no lineales, pero para casi todos los asuntos prácticos del GPR los medios se consideran lineales, homogéneos e isótropos, quedando estos tensores reducidos a cantidades escalares complejas.

4.1.2 Propiedades electromagnéticas de la materia

Las propiedades de los materiales que controlan el comportamiento de la energía electromagnética en un medio son los siguientes:

Conductividad eléctrica (σ)

La conductividad es la capacidad de un material de transportar las cargas eléctricas, es decir, que la conductividad se manifiesta mediante el flujo de una corriente eléctrica por la presencia de un campo eléctrico inducido, que a su vez produce el desplazamiento de cargas eléctricas de manera constante.

Permeabilidad magnética (μ)

La permeabilidad magnética indica que tan susceptible es un material al paso de un flujo magnético. Todos los cuerpos pueden clasificarse en lo que respecta a su comportamiento magnético, como *diamagnéticos* ($x < 0$), *paramagnéticos* ($x > 0$, pero pequeño) y *ferromagnéticos* ($x > 0$ y grande). Dentro de estos últimos existen subdivisiones muy importantes, que corresponden a los cuerpos *anti-ferromagnéticos*, y a los *ferromagnéticos*, aunque también puede considerarse estos como pertenecientes a tipos independientes de magnetismo (Orellana, 1982).

Permitividad o constante dieléctrica (ϵ)

La permitividad es la capacidad que cada material tiene para soportar el efecto de la polarización dieléctrica. Para el GPR, la permitividad es una medida general de que tan bien se transmite la energía de radar a profundidad. En general cuanto mayor sea la permitividad dieléctrica relativa de un material, la energía de radar viajara de forma más lenta a través del medio (Conyers, 2004) como se observa en la Figura 6.

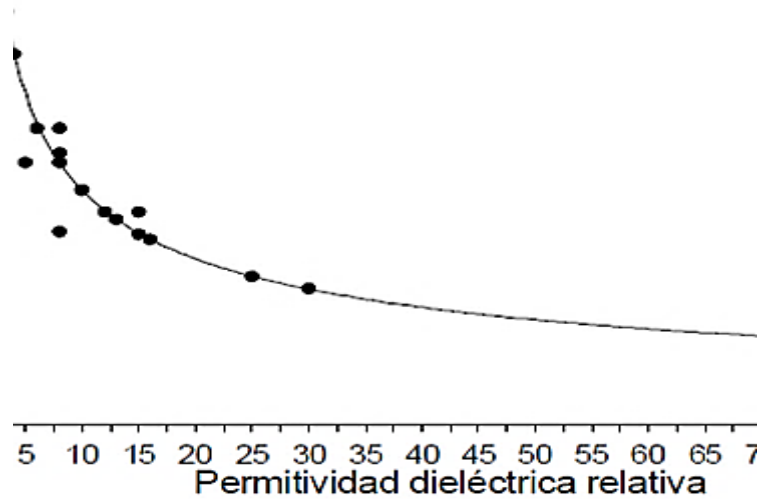


Figura 6. Gráfica de la permitividad relativa dieléctrica vs velocidad. La permitividad dieléctrica relativa es inversa a la velocidad de viaje del radar. Fuente: (Reynolds, 2011).

Los valores de permitividad dieléctrica relativa que se muestran en la Tabla 1 son muy aproximados y pueden cambiar de sitio a sitio y con la profundidad, pero estos son algunos valores típicos en materiales comunes, incluyendo el concreto, que es el medio en el que estaremos aplicando la técnica de radar de penetración terrestre en este trabajo.

Tabla 1. Permitividades dieléctricas relativas y velocidades típicas de algunos materiales comunes. Fuente: Modificada de (RAMAC GroundVision, 2009).

| Material | Permitividad relativa (ϵ_r) | Velocidad (m/ μ s) |
|------------|----------------------------------------|------------------------|
| Aire | 1 | 300 |
| Agua dulce | 80 | 33 |
| Caliza | 7 - 16 | 75 - 113 |
| Granito | 5 - 7 | 113 - 134 |
| Esquisto | 5 - 15 | 77 - 134 |
| Concreto | 4 - 10 | 95 - 150 |
| Arcilla | 4 - 16 | 74 - 150 |
| Limo | 9 - 23 | 63 - 100 |
| Arena | 4 - 30 | 55 - 150 |
| Morena | 9 - 25 | 60 - 100 |
| Hielo | 3 - 4 | 150 - 173 |
| Permafrost | 4 - 8 | 106 - 150 |

4.1.3 Principio de operación del GPR

El método consiste en emitir pulsos electromagnéticos desde la superficie del suelo, mismos que se propagan y se reflejan en las discontinuidades que hallan a su paso (Figura 7). La energía de los pulsos reflejados se mide sobre la superficie mediante dispositivos receptores. Por un lado, el tiempo que tarda el pulso desde que es emitido hasta que es detectado en la superficie da una medida de la profundidad de un dado reflector, conocidas las posiciones de la fuente y del receptor, y la velocidad de propagación de los pulsos en el medio. Por otro lado, la comparación de las amplitudes de los pulsos emitidos y recibidos brinda información adicional acerca de la composición del subsuelo.

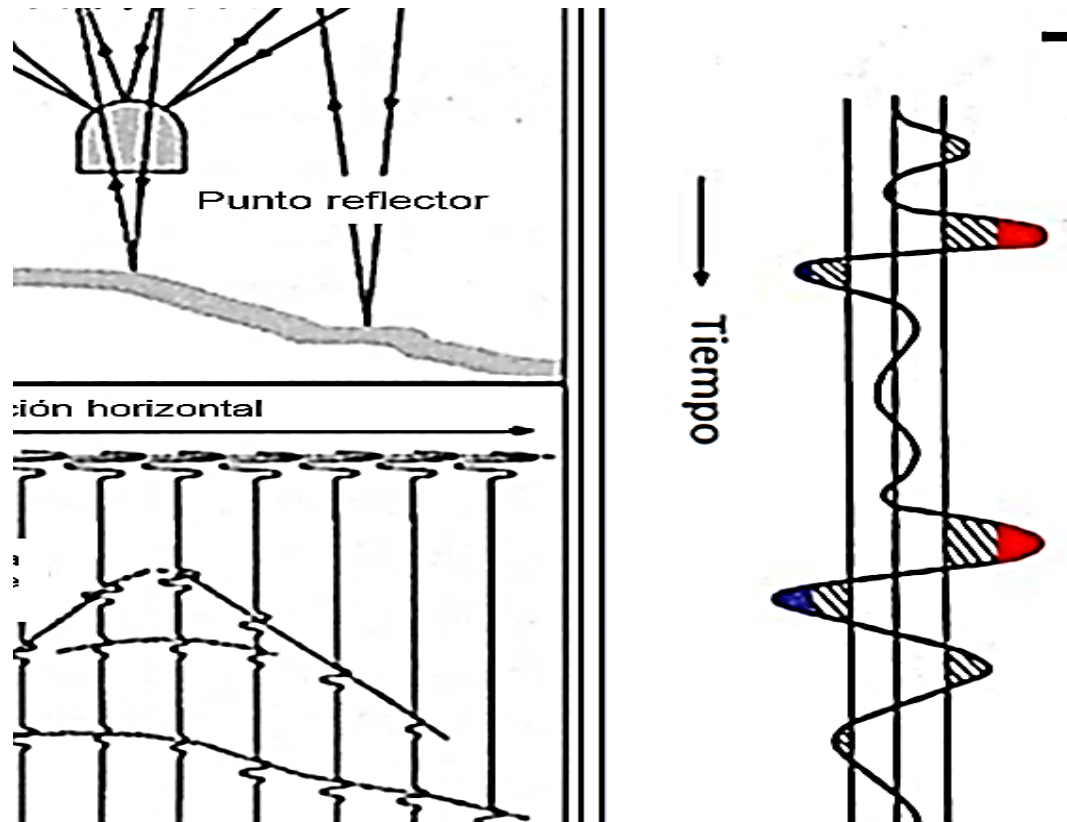


Figura 7. Principio de funcionamiento del GPR Fuente: Modificado de (RAMAC GroundVision, 2009).

Rango de frecuencias

Los sistemas de radar trabajan en rangos de frecuencias específicos, que van alrededor de los 10 a los 1000 MHz, es decir, en la categoría de ondas de radio cortas de muy alta frecuencia (VHF) y de ultra alta frecuencia (UHF).

Sistema GPR

Un sistema típico de GPR consta de una unidad de control, antena, unidad de almacenamiento, módulo de visualización, fuente de poder y sistema de posición que incluye odómetro y GPS (Figura 8).

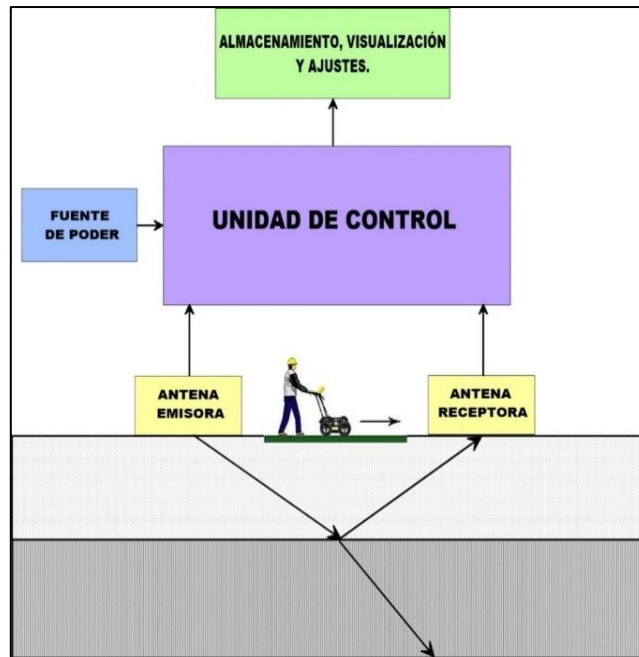


Figura 8. Diagrama simplificado de los componentes de un equipo de radar. Fuente: Elaboración propia

Tipos y frecuencias de antenas

La antena es parte fundamental de un equipo de radar, ya que es la encargada de emitir la señal del pulso electromagnético al medio, así como de recibir la señal cuando regresa a la superficie tras haber sufrido alguna reflexión y también resulta un factor importante en el diseño del estudio, ya que determina la resolución y la profundidad de penetración (**Baker, Jordan, & Pardy , 2007**).

Una antena puede ser usada como transmisora, receptora o ambas (monoestáticas o biestáticas). La antena transmisora transforma la energía eléctrica emitida por la unidad de control en un pulso electromagnético y la antena receptora capta la energía electromagnética reflejada en el medio y la convierte en un pulso eléctrico que es enviado a la unidad de control. Otra característica de las antenas de georadar es que comúnmente son blindadas o con escudo, ya que es importante que la mayor parte de la energía radiada lo haga en una única dirección. Esto permite mejorar la relación señal/ ruido, permitiendo obtener registros nítidos con un rango más elevado. La disminución del ruido se produce porque al emitir la

energía únicamente hacia el interior del medio de estudio se evita las reflexiones en objetos externos (Pérez, 2001).

Frecuencia central de la antena

La frecuencia en torno a la cual la mayoría de los pulsos de energía se concentra se llama frecuencia central de la antena. Las ondas de baja frecuencia tienden a penetrar más profundamente en el subsuelo, ya que no se atenúan tan fácilmente como las ondas de alta frecuencia. Sin embargo, la capacidad de un sistema GPR para resolver las características más finas del subsuelo o encontrar algún objetivo de dimensiones pequeñas, se puede ver deteriorada a bajas frecuencias. De ahí la importancia de la elección de la frecuencia óptima de la antena a partir de las necesidades del estudio y del compromiso entre la resolución deseada y la profundidad alcanzable (Harari, 1996). Como regla general, es mejor cambiar la resolución por la profundidad, ya que con una alta resolución es posible que el objetivo no pueda ser detectado (Annan, 2005).



Figura 9. Antenas blindadas de 100, 250, 500 y 800 MHz de la marca MALA. Fuente: (Geoelec, 2017)

A continuación, se muestran las antenas que maneja la marca sueca MALA y sus usos frecuentes (Figura 9); en el caso de este estudio se utilizó la antena de 800 MHz:

- **Antena de 800 MHz (~de 0.0 a 3.5 m):** Onda relativamente pequeña, con una longitud de onda de aprox. 2 a 5 cm, de ahí que podamos llegar a observar armado de varillas en columnas o paredes y evaluar las condiciones del concreto. Con una profundidad de penetración de 0 a 3.5m dependiendo del tipo de material.

- **Antena de 500 MHz (~de 0.0 a 6.5 m):** Longitud de onda de entre 4 a 10 cm, debido a esto podemos realizar exploración para detección de tuberías y drenajes. Su profundidad de penetración va de 0 a 6.5m dependiendo del tipo de material.
- **Antena de 250 MHz (~de 0.0 a 8-10 m):** Longitud de onda más grande, entre 8 a 15 cm; con esto podemos ser capaces de ver a mayor profundidad, pero a menor detalle los objetos pequeños (0 a 8 a 10m). Generalmente se utiliza para diferenciar rellenos, ver algún sistema de cavidades.
- **Antena de 100 MHz (~de 0.0 a 10-18 m):** Su longitud de onda está entre 15 a 40 cm, bastante mayor que las anteriores, entonces deberá especificarse un objeto de estudio de un tamaño considerable para que pueda ser observada con esta longitud de onda tan grande. Utilizada para ver algunos tipos de grietas o fallas en el subsuelo. Su profundidad de penetración de 0 a 18m dependiendo del tipo de material.

Aplicaciones del GPR

- Estratigrafía, a través de la exploración en suelos y capas de roca someras.
- Determinación de espesor del hielo en exploraciones en glaciares.
- Monitoreo de plumas de contaminación.
- Evaluación de la condición y profundidad de las cubiertas de puentes.
- Caracterización del estado del concreto, estado de las varillas y tipo de cimentación en obras civiles.
- Inspecciones de carreteras y pavimentos: estimación del espesor de asfalto.
- Inspección de estructuras de hormigón armado y estimación del espesor de losas.
- Búsqueda de vestigios arqueológicos.

- Inspecciones de vigas de madera para evaluaciones por presencia de hormigas y termitas.
- Detección o monitoreo de estructuras biológicas enterradas.
- Mapeo de recursos de aguas subterráneas.
- Investigaciones forenses.

4.2 Método de Ultrasonido

4.2.1 Fundamentos teóricos

El método de ultrasonido se fundamenta en la teoría de propagación de las ondas en medios materiales. Las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos, elásticos, homogéneos e isótropos a partir de un pulso vibratorio que incide en forma de ondas longitudinales o de compresión, ondas transversales o de cortante y ondas superficiales o Rayleigh.

La idea básica sobre la cual se establece el método de Ultrasonido es que la velocidad particular de una onda de compresión depende de las propiedades elásticas y la densidad del medio en el que se propaga, como se establece en la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}} \quad (1.8)$$

- *Dónde:* $V = \text{velocidad de onda compresional}$
- $K = \frac{(1-\mu)}{((1+\mu)(1-2\mu))}$
- $E = \text{Módulo de Young}$
- $\rho = \text{densidad}$

$$\mu = \text{coeficiente de Poisson}$$

El valor de K varía dentro de un rango bastante estrecho al igual que μ . Por lo tanto, las variaciones en E y ρ tienen un efecto más significativo en las variaciones de la velocidad V . Para el concreto, V generalmente varía de los 3000 a los 5000 m/s (Malhotra & Carino, 2004), dependiendo de la calidad de este.

También la frecuencia f dada en Hertz y la longitud de onda λ dada en unidades de distancia (por ejemplo, mm), están relacionadas con la velocidad de propagación V de la siguiente forma:

$$V = f\lambda \quad (1.9)$$

En un medio dado, un aumento en la frecuencia de onda por lo tanto dicta una disminución en la longitud de onda, y viceversa. Así la velocidad del pulso dependerá generalmente sólo de las características de los materiales, por tanto, las medidas de esta velocidad podrán ser calculadas y valoradas a partir de la condición o calidad del material.

4.2.2 Principio de operación del ultrasonido

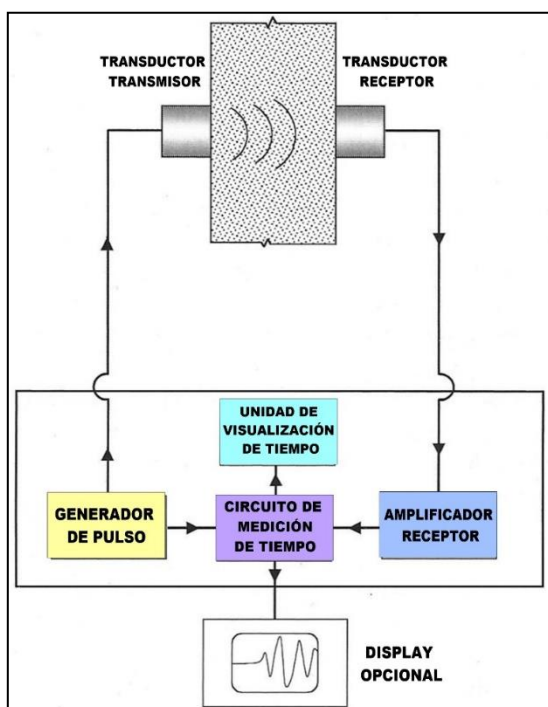


Figura 10. Diagrama esquemático del circuito del método ultrasonido Fuente: Modificado de (Malhotra & Carino, 2004).

El método consiste en la emisión de un pulso de onda a partir de un transductor generador o transmisor; dicho pulso viaja a través del concreto y es detectado por un transductor receptor colocado a una distancia L , y a partir de esto se puede medir con precisión el tiempo de tránsito Δt que le toma a la onda compresional viajar a través del concreto. Las frecuencias de las ondas utilizadas son del orden de los 54 kHz.

Por lo tanto, la velocidad de la onda compresional será:

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (1.10)$$

Según la norma (ASTM C597-83, 1991) un típico sistema de ultrasonido consta de un generador de impulsos, un par de transductores, un amplificador, un circuito de medición de tiempo, una unidad de visualización de tiempo y cables de conexión (Figura 10). De esta forma se obtiene un registro casi continuo a lo largo de la estructura, pila y/o pilote que permite determinar a cualquier profundidad si el material que lo constituye es homogéneo o tiene heterogeneidades.

Transductores

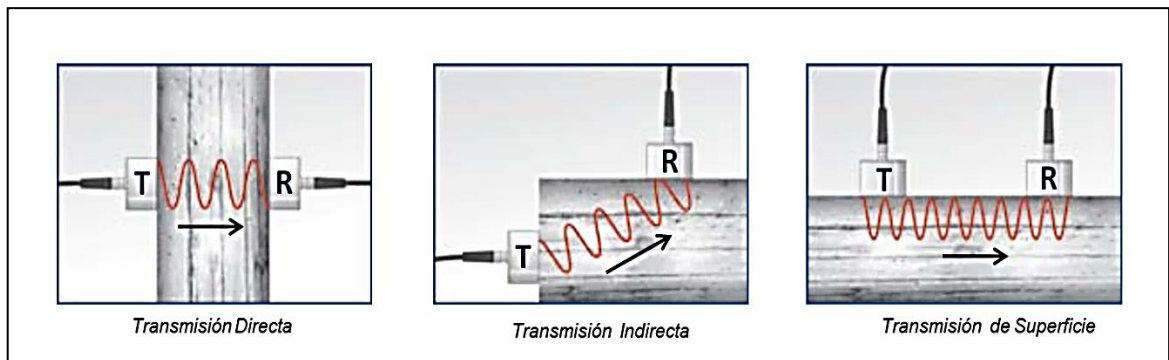


Figura 11. Tres posibles configuraciones en las que pueden ser dispuestos los transductores. transmisión directa, indirecta y de superficie. Fuente: Modificado de (Malhotra & Carino, 2004).

Hay tres configuraciones en la que los transductores emisor y receptor pueden ser dispuestos, como se observa en la Figura 11: transmisión directa, indirecta y de superficie.

Para transmitir o recibir el pulso, los transductores deben estar en contacto total con el objeto de prueba; de lo contrario, la bolsa de aire entre el objeto de prueba y los transductores puede introducir un error en el tiempo de tránsito indicado (Malhotra & Carino, 2004).

Muchos acopladores disponibles en el mercado pueden usarse para eliminar bolsas de aire y asegurar un buen contacto; la vaselina ha demostrado ser uno de los mejores acopladores. Otros acopladores son la grasa, jabón líquido, pasta de caolín-glicerol y gel.

Clasificación de calidad del concreto

De los estudios realizados en Canadá, Malhotra (1985) publicó un criterio de aceptación del concreto sobre la base de la medición de la velocidad ultrasónica. La clasificación del concreto en categorías con base a intervalos de velocidad se presenta en la Tabla 2:

Tabla 2. Clasificación del concreto en función de la velocidad de onda P, para concretos de 200 kg/cm^2 , su valor de velocidad puede ser cercano a los 3940 m/s. Fuente: Modificado de (Malhotra V. , 1985)

| Velocidad de onda P V (m/s) | Clasificación del concreto |
|----------------------------------------|-----------------------------------|
| V > 4575 | Excelente / E |
| 4575 > V > 3660 | Bueno / B |
| 3660 > V > 3050 | Regular / R |
| 3050 > V > 2135 | Pobre / P |
| V < 2135 | Muy Pobre / MP |

Factores que afectan a la velocidad de onda P en el concreto

El método de ultrasonido es relativamente sencillo y de fácil comprensión, pero para dar una correcta interpretación de los resultados es de suma importancia conocer los factores que afectan a la velocidad de propagación de la onda. Estos factores provenientes de las propiedades del concreto y otras fuentes externas son:

- **Componentes del concreto**

El concreto es un material compuesto esencialmente por un material aglutinante dentro del cual se encuentran partículas incrustadas o fragmentos de agregados pétreos.

De manera general, el concreto está compuesto por 4 elementos: agregados, agua, cemento y aditivos (sí se requieren). Los agregados son el material granular como arena, grava, escoria y piedra triturada, estos son divididos en dos grupos: finos y gruesos. El cemento es un material seco finamente pulverizado que desarrolla la propiedad de aglutinamiento como resultado de la hidratación. Para concretos, se puede utilizar casi cualquier agua natural que sea potable, incolora, inodora e insípida; por último, los aditivos se definen como materiales que se agregan al lote de concreto inmediatamente antes o durante la mezcla, para cambiar o mejorar las propiedades, es decir, el tiempo que el concreto requiere para fraguar y endurecer, su trabajabilidad o la obtención de alta resistencia temprana, entre otras (IMCYC, 2004).

Los efectos causados en la velocidad a consecuencia de los componentes del concreto son variados; por ejemplo, la velocidad del pulso de la pasta de cemento es menor que la del agregado, esto fue observado en diversas pruebas en las que para la misma mezcla de concreto y al mismo nivel de resistencia a la compresión, un concreto con grava redondeada tenía la velocidad de pulso más baja, el de caliza triturada resultó con una velocidad de pulso más alta. En otras pruebas también se observó que, al mismo nivel de resistencia, un concreto con el contenido de agregado más alto presentaba una velocidad de pulso más alta.

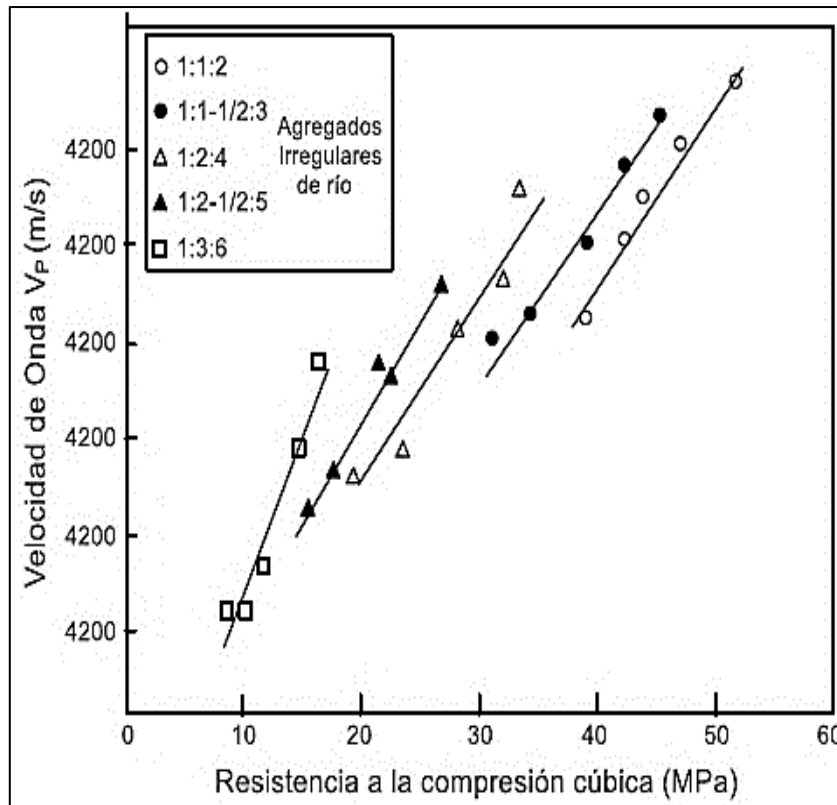


Figura 12. Relación entre la velocidad V_p y la resistencia a la compresión en función de la variación del agregado. Fuente: (Romero, 2016).

En la Figura 12 se muestra la relación entre la velocidad de onda V_p y la resistencia a la compresión en función de la variación del agregado; se observa que independientemente del tipo y cantidad de agregado, si éste no presenta irregularidades las velocidades son en general altas, por arriba de los 4200 m/s (Romero, 2016).

También la llamada relación agua-cemento (w/c) afecta a la velocidad del ultrasonido. A medida que aumenta (w/c), las resistencias a la compresión, flexión y la velocidad del pulso correspondiente disminuyen, suponiendo que no exista otros cambios en la composición del concreto (Malhotra & Carino, 2004).

En cuanto a los aditivos, existen algunos que además de influir en la velocidad del pulso, lo harán también en la velocidad de la hidratación. Por ejemplo, la adición de cloruro de calcio reduciría el tiempo de fraguado del hormigón y aumentaría la velocidad del pulso.

- **Edad del concreto**

El efecto de la edad del concreto en la velocidad del pulso es similar al efecto sobre el desarrollo de la resistencia del concreto. De algunas pruebas realizadas, se ha mostrado que la velocidad aumenta muy rápidamente al principio, pero alrededor de los 28 a 30 días muestra un comportamiento asintótico y es después de este lapso que es factible realizar pruebas de ultrasonido que arrojen valores de velocidad confiables y representativos del concreto ya fraguado en su totalidad.

En la Figura 13 se observa la relación existente entre la edad del hormigón a los 7,14, 21 y 28 días con los valores de velocidad de onda. Se observa cómo después de los 28 días la velocidad tiende a estabilizarse. Estas gráficas corresponden a una resistencia de 30 MPa; si esta resistencia fuera diferente, el comportamiento sería totalmente diferente en cuánto a los días y la velocidad obtenida.

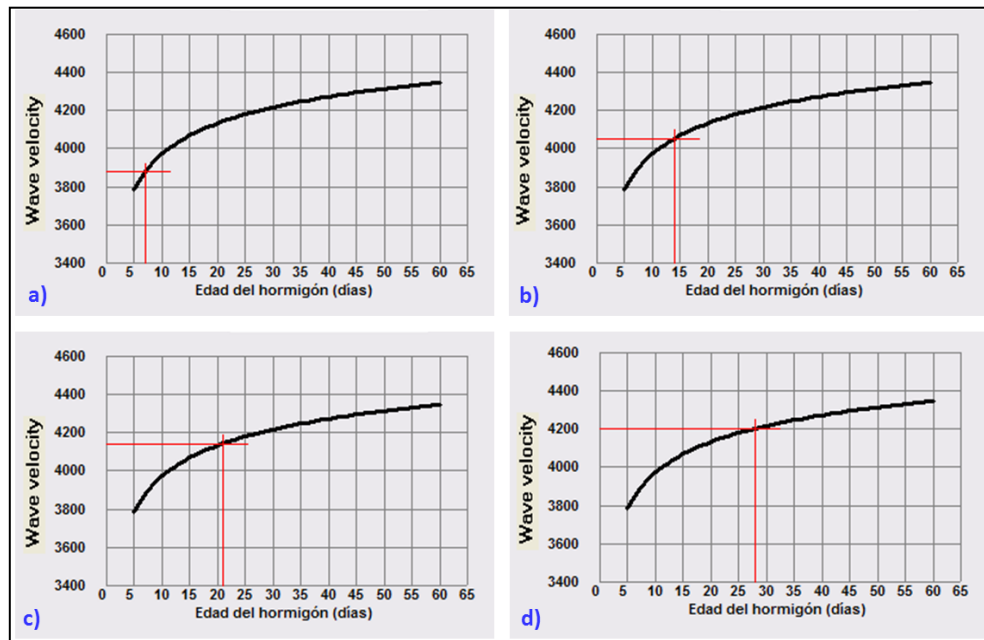


Figura 13. En las gráficas se observa la relación existente entre la edad del hormigón a los a) 7 días, b) 14 días, c) 21 días y d) 28 días y la velocidad de onda. Fuente: (Pile Echo Tester, PET, n.d.)

El contenido de agua en el concreto puede tener también una pequeña pero significativa influencia en la velocidad del pulso. Por lo general, la velocidad se ve aumentada con el contenido de agua en la estructura ensayada. La velocidad en el concreto saturado puede estar hasta un 2% más alta que en el concreto seco de la misma composición y calidad, aunque este valor es probablemente más bajo para el concreto de alta resistencia (Céspedes, 2003), por lo que es recomendable esperar a que el concreto haya fraguado por completo para evitar tener estos valores tan altos o al contrario realizar la prueba de velocidad antes para asegurar una buena práctica del fraguado.

- **Armado metálico o acero de refuerzo**

La presencia de armado metálico, varillas o acero de refuerzo son uno de los factores más importantes que influye en la velocidad del pulso del concreto. La velocidad del pulso en acero es de 1.4 a 1.7 veces la velocidad del pulso en concreto simple. Por lo tanto, las lecturas de la velocidad del pulso en las proximidades del acero de refuerzo son generalmente más altas que en las del concreto. Siempre que sea posible, las lecturas de prueba deben tomarse de manera que se evite el armado metálico en la trayectoria de la onda. Si los refuerzos cruzan la trayectoria de la onda, se deben usar factores de corrección (Malhotra & Carino, 2004).

Aplicaciones del ultrasonido

- Detección indirecta de la presencia de fallas internas como grietas, huecos, grietas horizontales u otros daños.
- Estimación de la resistencia del hormigón.
- Establecimiento de la homogeneidad del concreto
- Estudios sobre la hidratación del cemento.
- Estudios de durabilidad del hormigón.

4.3 Método PIT (Pile Integrity Test)

4.3.1 Fundamentos teóricos

Todos los métodos de prueba no destructivos como lo es la Prueba de Integridad de Pilotes (PIT) basan su funcionamiento en la propagación de ondas elásticas en sólidos. Este método ha dado resultados satisfactorios en la inspección de estructuras largas y verticales, principalmente en la inspección de cimentación con pilas o pilotes, así que se abordarán los antecedentes teóricos para este caso en particular.

Propagación de ondas elásticas

De acuerdo con el manual del equipo utilizado en este estudio (User Manual PET, 2013), al golpear la parte superior de la pila con el martillo, creamos una onda sísmica que se mueve hacia abajo. El análisis de la propagación de ondas en pilas es bastante sencillo, siempre que hagamos algunas asunciones:

- La pila es prismática (o cilíndrica), con sección transversal A , elástica con módulo E de Young y homogénea con densidad ρ .
- La longitud de onda es mayor que la dimensión lateral de la pila/pilote.
- Las secciones transversales permanecen planas, paralelas y sujetas a esfuerzos.

Reflexión

Cuando las ondas se propagan en una barra finita, eventualmente llegarán al final. Luego, la onda se reflejará hacia atrás y la naturaleza de la reflexión dependerá de las condiciones de contorno al final.

Si tomamos una barra prismática con una longitud dada L y aplicamos una carga de corta duración (dinámica) a un extremo, la onda creada viajará a lo largo de la barra y regresará desde el otro extremo.

La duración de todo el viaje es $T = \frac{2L}{c}$ (User Manual PET, 2013).

Discontinuidades

Una discontinuidad en una barra se define como un cambio brusco en la sección transversal (de A_1 a A_2) o en las propiedades del material E y ρ . Cuando una onda que viaja en una barra se encuentra con tal discontinuidad, una parte de ella se reflejará hacia atrás, mientras que otra parte se transmitirá más allá de la discontinuidad (Figura 14).

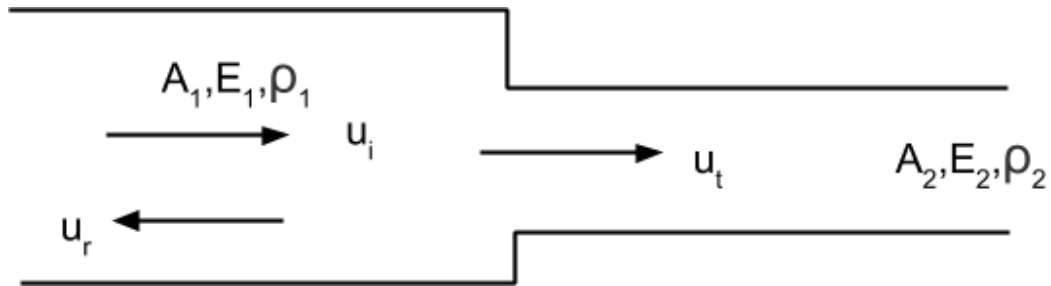


Figura 14. Una barra con una discontinuidad. Fuente: Modificado de (User Manual PET, 2013).

4.3.2 Principio de operación del PIT

El PIT se basa en los principios del método de impacto sísmico. Este método es del tipo cualitativo, debido a que no calcula la velocidad en el concreto, sino que esta es asignada a partir de los datos obtenidos por alguna prueba previamente aplicada, como la de ultrasonido. La pila se golpea en la parte superior o cabezal con un martillo ligero (con un peso aproximado de 900 gramos y una duración de pulso menor a 1 ms), generando una onda que se propaga a lo largo del fuste de la pila hasta encontrar un reflector o discontinuidad. Como receptor se utiliza un acelerómetro y la señal se almacena en un sistema de adquisición de datos como un reflectograma, que posteriormente podrá ser procesado (Figura 15).

Según (Malhotra & Carino, 2004) la forma de onda puede ser simple o compleja según el objeto de prueba. Interpretaciones de formas de onda en el dominio del tiempo, basándose en la ecuación:

$$T = \frac{1}{2} \Delta t C_p \quad (1.11)$$

Donde T es la profundidad, Δt es el tiempo de viaje de ida y vuelta y C_p la velocidad de la onda P; estas interpretaciones han tenido éxito para estructuras largas y delgadas, como las

pilas o pilotes. Estos tipos de estructuras funcionan como “guías de onda”, es decir, la geometría de la estructura actúa para enfocar la energía de la onda propagada dentro de un límite estrechamente definido. Además, hay tiempo suficiente entre la generación del pulso sísmico y la recepción de la onda reflejada desde la superficie inferior o desde una inclusión u otra discontinuidad, de modo que el tiempo de llegada de la onda reflejada es generalmente fácil de determinar, incluso si se utilizan impactos de larga duración producidos por un martillo.

Para pilotes prefabricados o pilas coladas en sitio, la prueba de impacto sísmico deberá efectuarse después de 3 a 4 semanas del colado o inmediatamente de que el concreto alcance el 75% de la resistencia de diseño para garantizar un grado de endurecimiento y un módulo de elasticidad que permitan que la onda se propague (ASTM D5882-07, 2007).

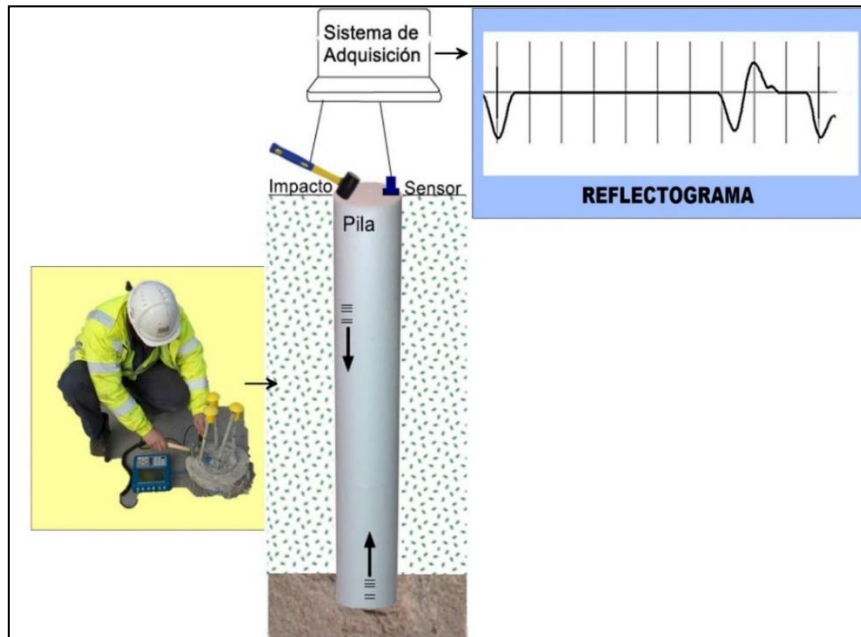


Figura 15. Los componentes de la prueba de PIT son: sistema de adquisición, almacenamiento y procesamiento (compatible con cualquier computadora portátil, martillo de mano y acelerómetro), y la gráfica obtenida es llamada reflectograma. Fuente: Elaboración propia.

Características de la pila en el reflectograma

El registro o reflectograma resultante, contiene información acerca de la geometría y la longitud de la estructura; cambios abruptos que pueden deberse a un cambio de material (tal como ocurren comúnmente en la base de la pila), un cambio en el área de sección o una fractura (Davis & Dunn, 1974) , entre otras cuestiones.

Instituciones como la Universidad de Texas (Briaud, Ballouz, & Nasr, 2002) y la Universidad de Houston (Samman & O'neil, 1997) han realizado pruebas en sitio para determinar el éxito del método del PIT bajo ciertas circunstancias, y encontraron lo siguiente:

- Condiciones detectables: inclusiones de tamaño considerable en el concreto, base de la pila, fracturas, juntas, incremento y decremento en la sección transversal, cambios litológicos en las capas circundantes a la pila, cambios bruscos del material que conforma la pila.
- Condiciones no detectables: incremento o decremento gradual a lo largo de toda la pila, formas curvas, inclusiones muy pequeñas, cambios graduales del material dentro de la pila, suelos blandos en el contacto con la base de la pila, fragmentos o material suelto en la base y paquetes de lodos o limos.







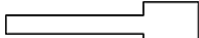

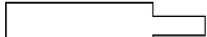



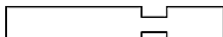





El conocimiento o detección de las características de las pilas o discontinuidades está limitado por el contenido de frecuencias de las ondas que se propagan a lo largo de la estructura. Ondas de baja frecuencia se utilizan para identificar la base de la pila y se necesitan de frecuencias más altas para detectar defectos pequeños en el concreto (Romero, 2016). Sin embargo, lo ideal es que las longitudes de onda sean más grandes que el diámetro de la pila o pilote, para asegurar que la propagación de la onda sea esencialmente unidimensional.

Influencia de factores en los reflectogramas

Según (Davis & Dunn, 1974) las respuestas obtenidas de pilas o pilotes reales en el sitio de estudio, rara vez son tan simples como el reflectograma que resulta de una pila perfecta. Esto puede deberse a numerosos factores entre los cuales los más comunes son:

- Variaciones en el diámetro de la pila o pilote.
- Variaciones en la calidad del concreto dentro de la pila o pilote.
- Variaciones en la rigidez del suelo a través del cual pasa la pila o pilote.
- La parte de la pila está expuesta sobre el suelo.

Tabla 3. Casos de reflectogramas típicos asociados a pilas o pilotes. Fuente: Modificado de (User Manual PET, 2013).

| Perfil de la pila | Descripción | Reflectograma |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Pila recta, extremo libre |  |
|  | Pila recta, extremo fijo |  |
|  | Pila recta, extremo libre, más corta de lo esperado |  |
|  | Impedancia aumentada |  |
|  | Impedancia disminuida |  |
|  | Impedancia localmente incrementada |  |
|  | Impedancia localmente decrementada |  |
|  | Reflexiones múltiples desde la discontinuidad de longitud media - reflexión del pie de la pila imperceptible |  |
|  | Perfil irregular-reflectograma irregular. |  |

Existen algunos casos típicos de reflectogramas, en dónde es posible observar algunos comportamientos de la señal que corresponden a características específicas de pilas y pilotes, estos se muestran en la Tabla 3.

Si nuestro reflectograma cae dentro de una de estas categorías (a excepción de la última que corresponde a un reflectograma irregular), significa que podemos justificar la existencia de pilas o pilotes en ubicaciones específicas en nuestro proyecto, así como la posible caracterización de estos elementos, a partir de una correcta interpretación de nuestros reflectogramas. De lo contrario, tenemos que intentar realizar la prueba en otro lugar o identificar la causa de respuestas distintas a las que típicamente se tienen en los reflectogramas con la prueba PIT.

Aplicaciones del PIT

- Estimación de posibles impurezas en el concreto
- Estimación de la presencia de fracturas y juntas.
- Espesor de losas de concreto y otras estructuras de cimentación.
- Estimación de longitud pilas y pilotes.
- Estimación de inclusiones de material extraño con diferentes propiedades elásticas.
- Estimación de cambios en la sección transversal.

4.4. Método Sísmica de Reflexión

Este método es por mucho, el más ampliamente utilizado en la exploración geofísica debido a las innovaciones tecnológicas alcanzadas y a la ventaja en sitios donde las discontinuidades o cambios de formación están muy próximos a la superficie. De manera general, este método se basa de en la medición de los tiempos de arribos y, por ende, en una propiedad física de las ondas sísmicas llamada velocidad de propagación. Estas ondas sísmicas generadas a partir de un pulso en la superficie; viajan y se reflejan a través de distintos medios, estas reflexiones son detectadas por medio de instrumentos sensibles llamados geófonos, que se colocan a lo largo de la superficie, a cierta distancia de la fuente o el punto de origen y a partir de estos registros de tiempo es posible calcular valores de velocidad y profundidad para cada interfaz reflectante.

4.4.1 Fundamentos teóricos

Las ondas sísmicas son ondas elásticas que causan deformaciones que resultan no ser permanentes en el medio en el que se propagan y viajan con una velocidad que depende de las propiedades elásticas y de la densidad del material. La deformación consiste en la alternación de compresiones y dilataciones en respuesta a las fuerzas asociadas a la propagación de dichas ondas sísmicas.

Tipos de ondas

En un medio elástico pueden transmitirse dos tipos de ondas. Estas son comúnmente conocidas como ondas P y S, u ondas de compresión y de corte, sus características principales son la dirección del movimiento de las partículas con respecto a la dirección de la propagación o frente de onda y que son llamadas ondas internas o de cuerpo porque se propagan en el interior de un sólido elástico (Figura 16):

- a) En una **onda P**, el movimiento de las partículas es paralelo a la dirección de propagación; esta onda está asociada con el esfuerzo normal y puede propagarse en cualquier tipo de medio.
- b) En una **onda S**, el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación; esta onda está asociada con el esfuerzo cortante y puede propagarse solamente en medios con rigidez al corte, es decir, sólo en sólidos.

Además de estas dos clases de ondas, existen otras llamadas ondas superficiales, llamadas así porque cuando un sólido posee una superficie libre, como la superficie de la Tierra, pueden generarse ondas que viajan a lo largo de la superficie, como lo son las ondas de Rayleigh y de Love:

- c) En una **onda de Rayleigh**, también llamada onda de superficie u onda R, el movimiento de las partículas es elíptico retrógrado y esta se propaga a lo largo de la superficie de un sólido.
- d) En una **onda de Love**, el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación, como las ondas S, sólo que “polarizadas” en el plano de la superficie del sólido, por esto sólo poseen las componentes horizontales paralelas a la superficie.

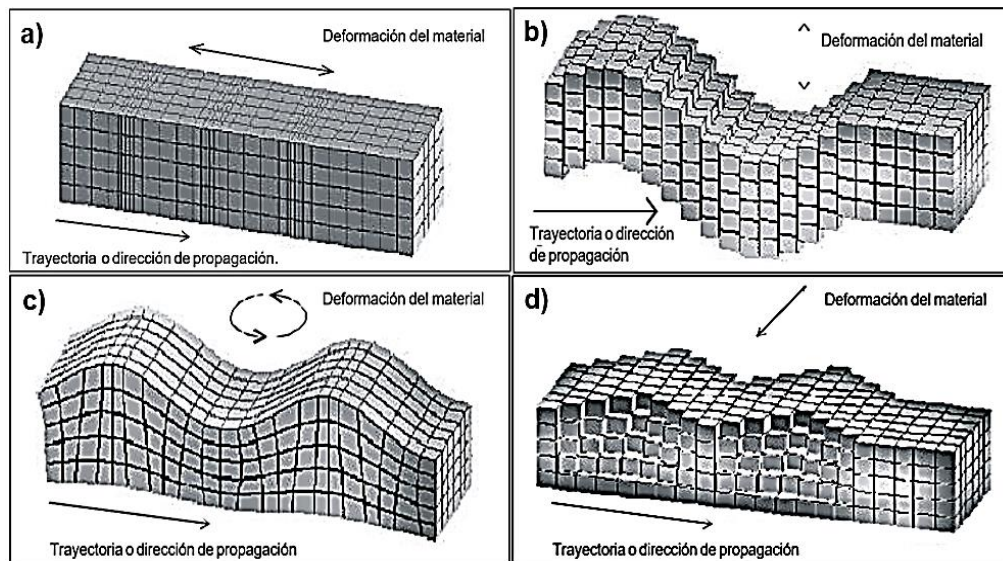


Figura 16. Tipos de onda y su propagación en el medio: a) onda p, b) onda s, c) onda de Rayleigh y d) onda de Love. Fuente: Modificado de (Martínez Gutiérrez & Weppen , 2005).

Principio de Huygens

Esta es una de las leyes que rigen el mecanismo de propagación de onda. Afirma que cada punto alcanzado por un frente de onda actúa como una nueva fuente de onda que se extiende en todas direcciones generando ondas secundarias. Las líneas perpendiculares a los frentes de onda, llamadas trayectorias de onda o rayos, a menudo se pueden usar para describir la propagación de la onda de manera más conveniente que los frentes de onda (Dobrin & Savit, 1988).

Principio de Fermat

Este principio enuncia que las trayectorias de rayo entre dos puntos son aquellas para las cuales el tiempo de viaje es un mínimo, con respecto a las posibles trayectorias (Stein & Wyssession , 2003).

Ley de Snell

En el caso de la reflexión, las ondas P incidentes y reflejadas tienen el mismo ángulo de incidencia.

$$\text{sen } i = \text{sen } r \quad (1.12)$$

Reflexión de una superficie horizontal

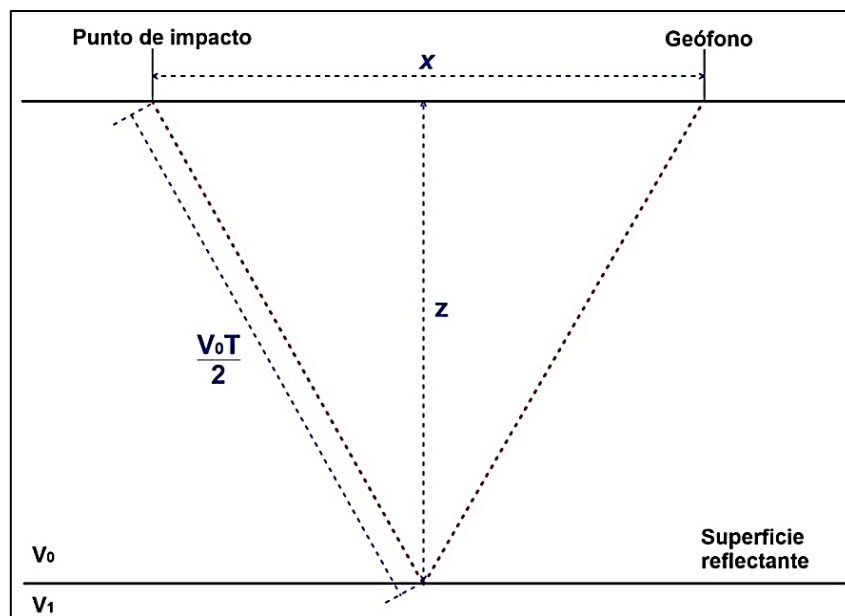


Figura 17. Onda reflejada desde una sola interfaz. Velocidad constante entre la fuente y la superficie reflectante. Fuente: Elaboración propia.

Supongamos una interfaz de reflexión horizontal, como se muestra en la Figura 17, a una profundidad z . La velocidad sísmica por encima de la interfaz es V_0 , y la de abajo es V_1 . La trayectoria de una onda reflejada generada en el punto de disparo y recibida por un detector a una distancia x , consiste, como se indica en el diagrama, en dos segmentos rectilíneos que han viajado desde la superficie a la interfaz reflectora y de regreso a la superficie. La longitud total de la trayectoria L está relacionada con x y z por la fórmula:

$$L = 2 \sqrt{z^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2} = V_0 T \quad (1.13)$$

De dónde:
$$z = \frac{1}{2} \sqrt{(V_0 T)^2 - x^2} \quad (1.14)$$

4.4.2 Principio de operación del método de Sísmica de Reflexión aplicado a pilas, pilotes y/o estructuras de concreto.

Al igual que todos los métodos de impacto sísmico, esta prueba se realiza utilizando un martillo que actúa como fuente y la respuesta del medio es registrada por un tendido de geófonos acoplados en la parte superior de la estructura.

Los geófonos, algunas veces denominados detectores o sismómetros, son la unidad en contacto directo con la superficie del medio, que tiene la capacidad de transformar la deformación mecánica (producida por el impacto) en señales eléctricas. Estos, reciben las oscilaciones en forma de señal analógica y posteriormente se muestrea la señal para generar una serie de tiempo. Las muestras se digitalizan a través de un conversor analógico – digital (ADC), se almacenan y son mostradas en un módulo de visualización (display) obteniendo lo que se denomina traza sísmica. La gráfica de los tiempos de llegada de las diversas ondas registradas desde el momento del primer impacto es a lo que se llama sismograma.

Como vemos en la Figura 18, para pilas y/o pilotes la prueba se realiza acoplando geófonos y midiendo su respuesta sobre la cabeza. La onda compresiva es en parte reflejada de vuelta hacia la cabeza de la pila por algún cambio en las propiedades elásticas del material, asociadas a la base, defectos en la pila o cambios en la densidad del concreto (**Davis & Dunn, 1974**).

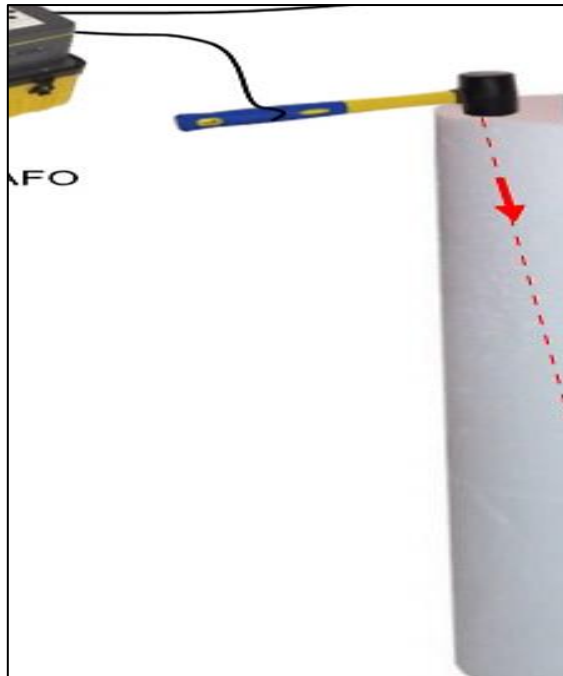


Figura 18. Sistema de reflexión sísmica para en ensayo en pilas y pilotes. Fuente: **(Romero, 2016)**.

Generalmente, el registro de reflexión sísmica para una pila sana muestra dos reflexiones significativas, la primera al inicio producida por el impacto (onda directa), y la segunda producida por la base de la pila. En la Figura 19 podemos observar un registro típico de un ensayo de sísmica de reflexión de una pila.

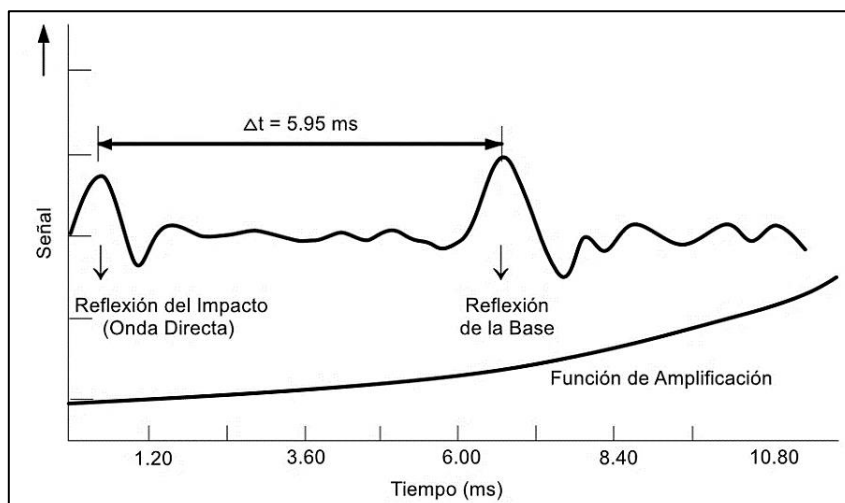


Figura 19. Registro típico de la respuesta de un ensayo de sísmica de reflexión en una pila sana en el dominio del tiempo. Fuente: Modificado de **(Hertlein & Davis, 2007)**.

También es posible utilizar este ensayo para estructuras de concreto como zapatas, losas y columnas, a partir de un tendido de geófonos acoplados en la parte superior de la estructura, como es el caso de este estudio (Figura 20). Esto con la finalidad de definir el estado general de la estructura, la profundidad de esta, así como caracterizar con la velocidad de onda “P” la calidad del concreto con la que está conformada o algún otro objetivo específico en el proyecto de exploración.

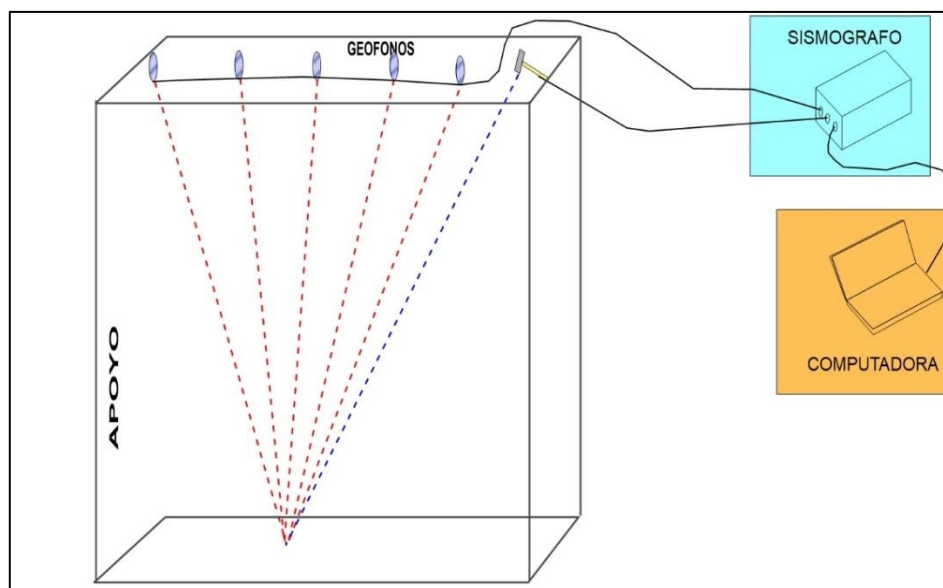


Figura 20. Ensayo de sismica de reflexión sobre uno de los apoyos del puente Teapa 2. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

Cálculo de la velocidad de onda “P” (V_p)

El cálculo de V_p , para el ensayo en una pila y/o pilote, se efectúa midiendo la diferencia de tiempo del arribo de los geófonos colocados a una distancia conocida. Para medir la velocidad de la onda P simplemente se miden las diferencias de tiempo (Δt) entre el arribo de los picos iniciales registrados por los geófonos, que como dijimos se encuentran a una distancia conocida (d), como se muestra en la Figura 21.

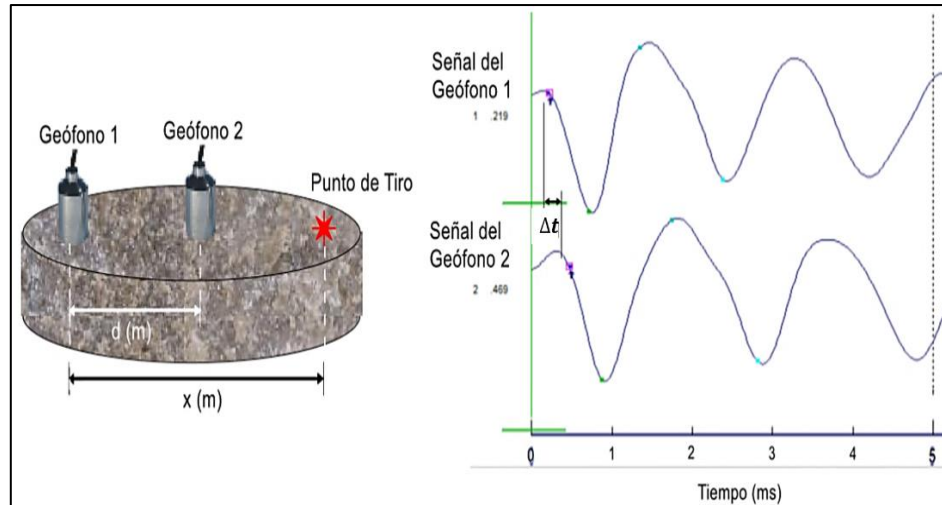


Figura 21. Metodología propuesta para medir la velocidad de la onda directa a partir de la distancia entre geófonos y el tiempo de retardo. Fuente: Romero, 2016.

Cálculo de la longitud de la pila y/o pilote o estructura de concreto

Entonces, a partir de la velocidad V_p , el intervalo de tiempo y el arribo de las ondas reflejadas en los diferentes geófonos es posible definir la distancia recorrida por la onda, determinar la longitud y la continuidad de una pila y/o pilote o de una estructura de concreto (Figura 22) (Malhotra & Carino, 2004), basándonos en las ecuaciones 1.13 y 1.14 mencionadas anteriormente (vea la sección *Reflexión de una superficie horizontal*):

Supongamos una interfaz de reflexión horizontal, producida por la base de la pila, base de una estructura de concreto o algún defecto, cuya profundidad z corresponde a la distancia entre el geófono y dicho reflector o a la longitud total de la pila o estructura, y está dada por la ecuación:

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{V_p^2 \Delta t^2 - x^2} \quad (1.15)$$

Dónde V_p , es la velocidad de la onda “P” en la pila o estructura ensayada, Δt el diferencial del tiempo y x la distancia horizontal del punto de tiro al geófono.

Este análisis se puede realizar también en el dominio de la frecuencia, a partir del análisis de la función fuerza-tiempo; aplicando la transformada de Fourier a esta función es posible

determinar la serie de ondas generadas por el martillo a diferentes frecuencias; se realiza un filtrado de datos y por último se hace el análisis de la profundidad (Abramo, 2011), a través de la ecuación:

$$z = \frac{V_p}{2\Delta f} \quad (1.16)$$

Dónde z es la profundidad, V_p la velocidad de la onda “P” y Δf es el diferencial de frecuencia.

Sin embargo, la interpretación de los datos de reflexión para la integridad en pilas parece más precisa en el dominio del tiempo, ya que en el dominio de la frecuencia hay ciertos aspectos en cuánto a los intervalos escogidos para realizar el análisis, que pueden ser no muy claros.

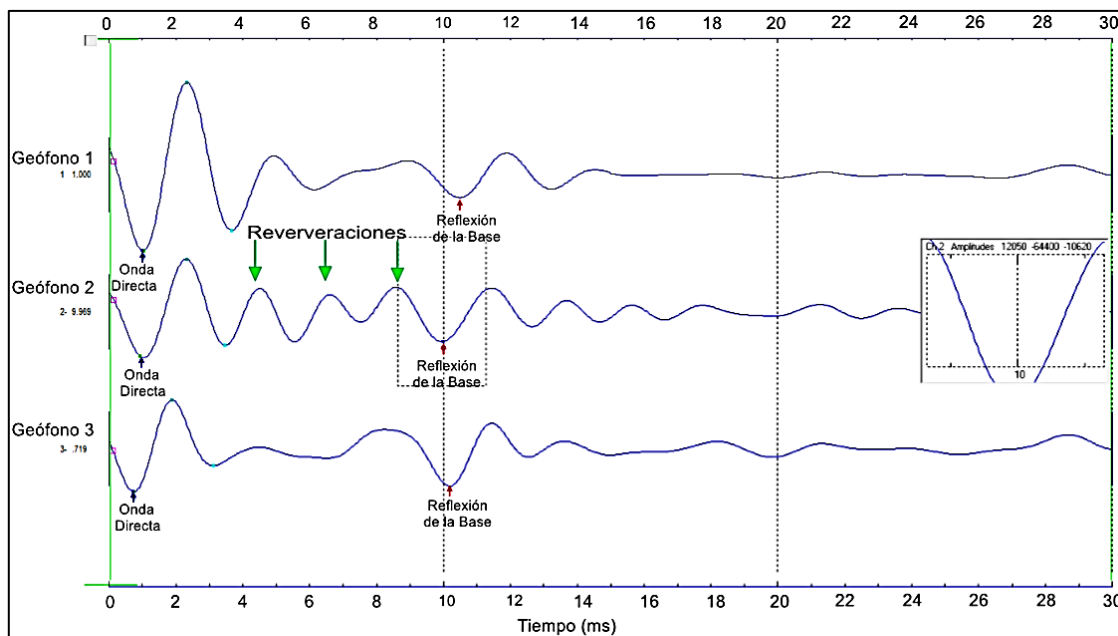


Figura 22. Sismograma obtenido mediante la Sísmica de Reflexión, donde se observa la reflexión producida por la onda directa y la base de la pila. Fuente: (Romero, 2016).

5. Adquisición y procesamiento de datos

5.1 Campaña de exploración

Se llevó a cabo una campaña de exploración sobre la base del puente, dónde fueron aplicados varios métodos en conjunto y con un orden específico (Figura 23); GPR (Ground Penetrating Radar), PIT (Pile Integrity Test), Ultrasonido y Sísmica de Reflexión.

El propósito principal fue determinar las características de la cimentación de la estructura (posibles pilotes de 40 a 80 cm de diámetro), así como el estado del concreto y alguna otra característica de interés, a partir del análisis de los resultados arrojados por cada uno de los métodos geofísicos aplicados.

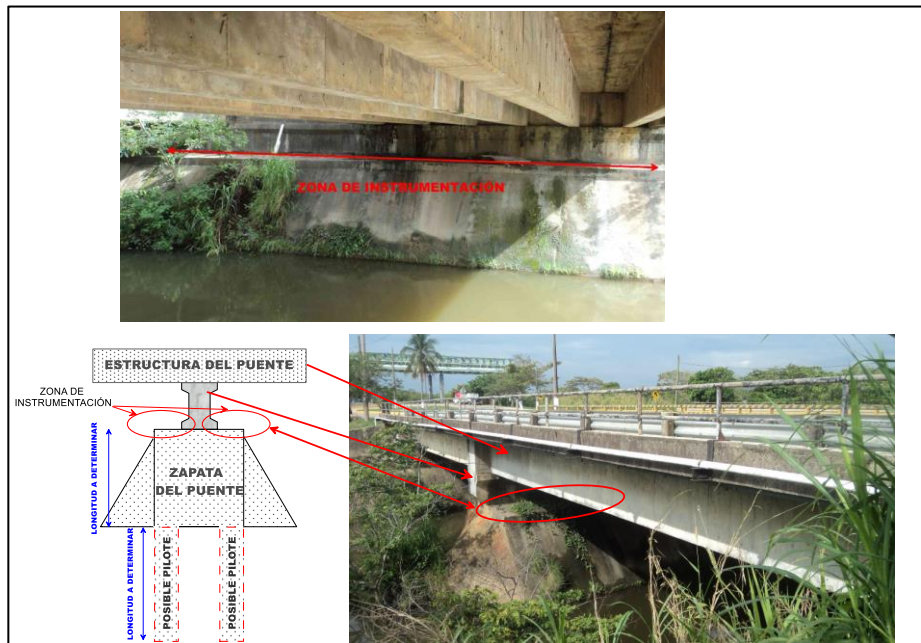


Figura 23. Propuesta inicial de exploración geofísica para cada uno de los apoyos del puente. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

A continuación, se describirá la adquisición y procesamiento de los datos de cada uno de los métodos aplicados para caracterizar la cimentación del puente, así como la secuencia seguida en campo, que resultó ser relevante para la óptima y rápida solución al reto que planteaba este proyecto.

5.2 Georadar (GPR; Ground Penetrating Radar)

5.2.1 Adquisición de datos de GPR

La adquisición de datos se llevó a cabo mediante el equipo de georadar de la marca MALA Ramac X3M y su correspondiente antena blindada de 800 MHz, computadora portátil para el despliegue de los datos en tiempo real, odómetro, cable para la transmisión de datos y fuente de energía. Se realizaron 9 líneas de georadar paralelas entre sí y distribuidas en cada uno de los 3 apoyos del puente.



Figura 24. Adquisición de datos sobre un apoyo del puente mediante el equipo de georadar MALA Ramac X3M. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

El método de adquisición de datos consistió en el desplazamiento de la antena receptora y emisora (antena monoestática) en el mismo sentido, guardando un offset constante entre ellas, también llamado offset común. Con esta forma de adquisición, las antenas tienen un carácter de polarización específico para el campo generado y detectado, los ángulos de

reflexión son iguales y la medición es hecha en intervalos regulares. El desplazamiento se realizó a una velocidad constante en 9 líneas rectas paralelas entre sí y distribuidas en cada uno de los apoyos, se utilizó un odómetro al momento del levantamiento para posicionar cada uno de los puntos en el radargrama (Figura 24).

Parámetros de ajuste iniciales

Existen una serie de parámetros que es necesario ajustar al inicio del levantamiento con el georadar y hay que asegurar que dichos parámetros resultan ser los más adecuados para el estudio, esto a través de la realización de líneas de prueba.

Como se observa en la Figura 25, el software del equipo Mala nos permite ajustar algunos parámetros como lo son: nombre de antena (antenna name), frecuencia de muestreo (sampling frequency), número de muestras (number of samples), número de trazas (number of traces), ventana de tiempo (time window), intervalo de trazas (trace interval) y separación de antenas (antenna separation), que es fijo en este caso.

| Measurement Information | | | | | |
|-------------------------|------------------|-----|--------------------|-------|----|
| Antenna Name | 800 MHz shielded | | | | |
| Sampling Frequency | 10488 MHz | MHz | Time Window | 90 | ns |
| Number of Samples | 943 | | Trace interval | 0.021 | m |
| Number of Stacks | 8 | | Antenna separation | 0.140 | m |
| Number of traces | 1275 | | | | |

Figura 25. Parámetros de ajuste iniciales en GPR. Fuente: (Ramac Groundvision, 2011).

Como se observa en la Figura 25, los valores de estos parámetros para este estudio fueron:

- Antena: 800 MHz
- Frecuencia de Muestreo: 10488 MHz
- Número de muestras: 943

- Número de trazas: 1275
- Ventana de Tiempo: 1275
- Intervalo de trazas: 0.021 m
- Separación de antena: 0.140 m

Levantamiento en los apoyos del puente

Para comenzar, sobre el apoyo 1 se realizaron algunas líneas de prueba para la calibración del equipo y definición de los parámetros de adquisición más adecuados para emplearse en este sitio, con la finalidad de poder observar la mejor respuesta del concreto de la zapata. Posteriormente se continuó con la realización de 3 líneas sobre el mismo apoyo; una primera pegada al paramento (hacia tierra), luego una segunda a 0.80 m y una tercera a 1.5 m (casi en el borde de la zapata).

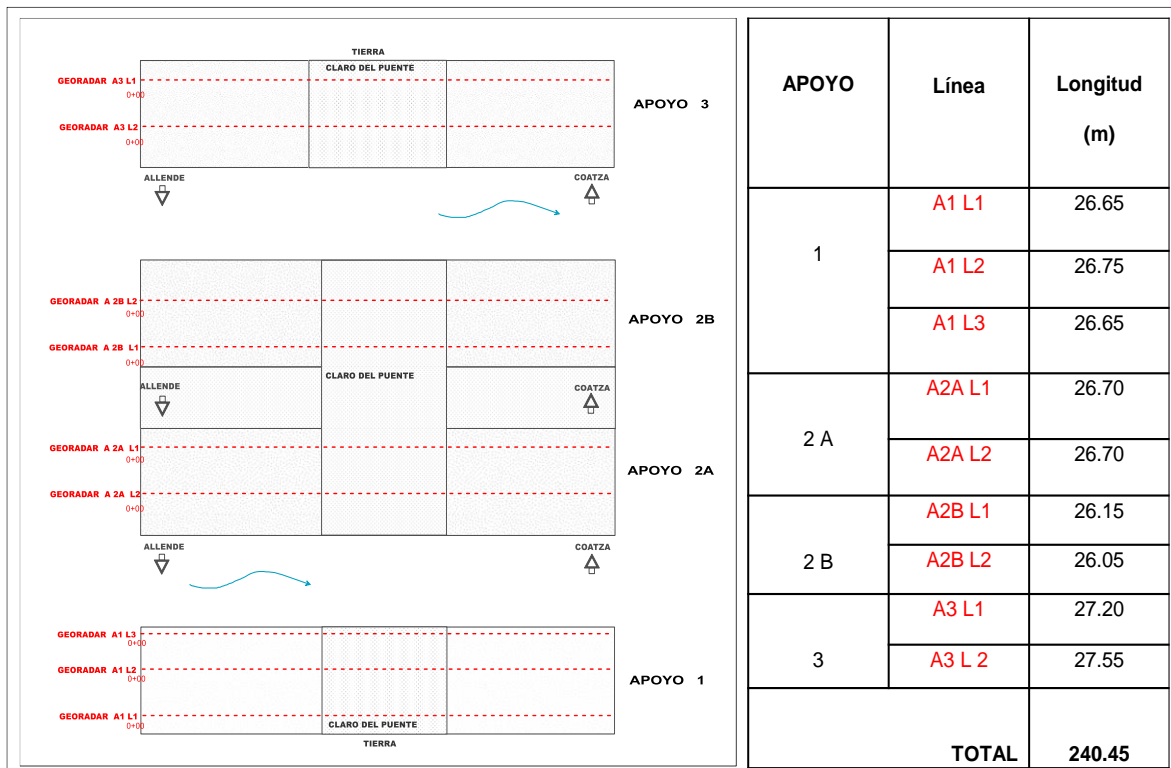


Figura 26. Croquis de exploración con GPR y longitud de las líneas realizadas. Fuente: Elaboración Propia.

En los apoyos restantes 2A y 2B (apoyo central) y apoyo 3 se efectuaron dos líneas en cada zapata (0.2 y 0.8 m del paramento) para poder definir la presencia de pilotes o no. En la Figura 26 podemos observar cada una de las líneas realizadas con su respectiva nomenclatura y longitud.

Radargrama

Al realizarse el desplazamiento de la antena sobre una línea recta de forma continua, se va adquiriendo un apilamiento de trazas que se grafican de manera ordenada y secuencial, formando un radargrama.

Los radargramas se pueden representar disponiendo las trazas una a la derecha de la otra, cada una de las trazas que forman parte del radargrama es un registro de amplitudes a lo largo del tiempo y también de los tiempos de propagación. Los incrementos en las amplitudes son ocasionados por el aporte de energía en cada reflexión durante la propagación de la señal por el medio.

El radargrama presenta un formato en el que el tiempo de viaje bidireccional o profundidad aproximada de las ondas se representan en el eje vertical y a lo largo del eje horizontal se presenta la distancia horizontal sobre la superficie del medio por la que se ha deslizado la antena.

El número de trazas de un radargrama depende de los parámetros de ajuste al inicio de la adquisición de datos, así como de la longitud de la línea levantada.

Registro de posibles fuentes de ruido

Durante la realización de cada una de las líneas con GPR en campo fue necesario realizar a la par un registro sobre la presencia de elementos en los apoyos del puente, que pudieran ser fuentes de ruido, como lo son:

- a) Objetos en la superficie de los apoyos, sobre los cuales la antena es desplazada.
- b) Tubos de drenaje.
- c) Objetos enterrados.

- d) Señales de alta frecuencia generadas por transmisores externos como antenas, celulares, etc.

La finalidad de contar con estas notas de campo es que, al pasar a la fase de procesamiento de los datos, es posible mejorar la imagen, aumentar la resolución y la relación señal-ruido a través de la eliminación o minimización de estas fuentes conocidas. Es por ello por lo que se realiza una previsualización de los datos y se comparan con dichas notas para identificar algunos de los elementos que se mencionaron anteriormente.

5.2.2 Procesamiento de datos de GPR

En el caso de los datos de georadar obtenidos en cada uno de los 3 apoyos del puente, se les fueron aplicados varios procesos de filtrado en el software de Mala, Ramac *GroundVision* 1.4.2. A continuación, se describe en que consiste cada uno de estos procesos empleados para mejorar los radargramas obtenidos y así poder distinguir las características de interés para este estudio.

Ajustes de la Escala (Scale Settings)

Antes de comenzar con el proceso es necesario modificar los ajustes de escala para los radargramas. Ramac *GroundVision* 1.4.2 permite ajustar la escala vertical en tiempo o profundidad con el primer arribo (*First Arrival*) y la velocidad o valor de la constante dieléctrica o velocidad de ajuste; para este estudio realizado sobre los apoyos constituidos por concreto se establecieron los valores de:

- Primer arribo a (*First Arrival at*): **30 muestras**.
- Ground Velocity: **100 m/ μ s**
- Velocidad de Ajuste: **100 m/ μ s**

Filtro de eliminación de nivel DC (*DC Removal*)

Este filtro es constantemente utilizado debido a que hay un desplazamiento constante en la amplitud de la traza registrada conocida como el nivel DC. Nos permite conservar la parte

de la señal que corresponde al primer arribo de la onda emitida por el radar en cada una de las trazas (Figura 27).

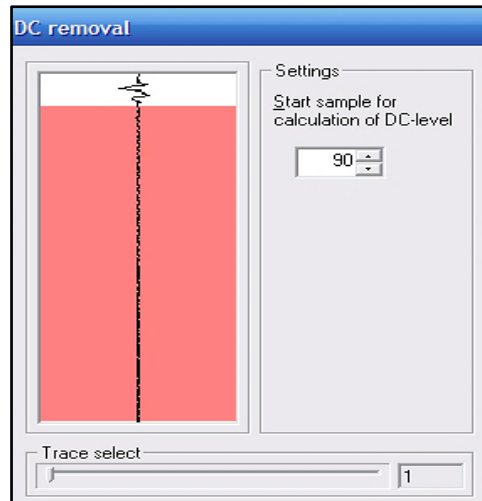


Figura 27. Ajuste de la señal correspondiente al primer arribo de la onda en una de las trazas. Fuente: (Ramac Groundvision, 2011).

Filtro de Ganancia Variable en el Tiempo (*Time Varying Gain*)

Este filtro aplica una ganancia variable de tiempo para compensar la amplitud perdida debido a la atenuación (Figura 28). La traza se multiplica por una función de ganancia que combina ganancia exponencial y lineal, con coeficientes proporcionados por el usuario.

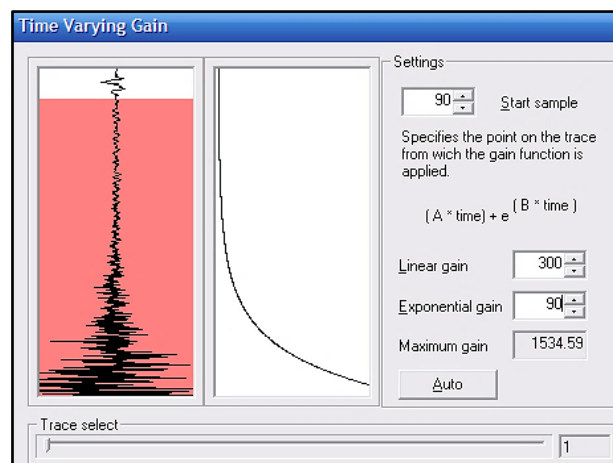


Figura 28. Filtro Time Varying Gain que permite compensar la amplitud perdida de la señal por la atenuación.

Fuente: (Ramac Groundvision, 2011)

Filtro Pasa Bandas (*Band Pass*)

Este filtro es utilizado para remover frecuencias no requeridas de las trazas (Figura 29) o para dejar pasar a la frecuencia central y un rango de componentes frecuenciales próximas delimitadas con f_1 y f_2 , cumpliendo con la regla de que exista una región simétrica (ancho de banda) equivalente al 25% del valor de la frecuencia central de nuestra antena (800 MHz).

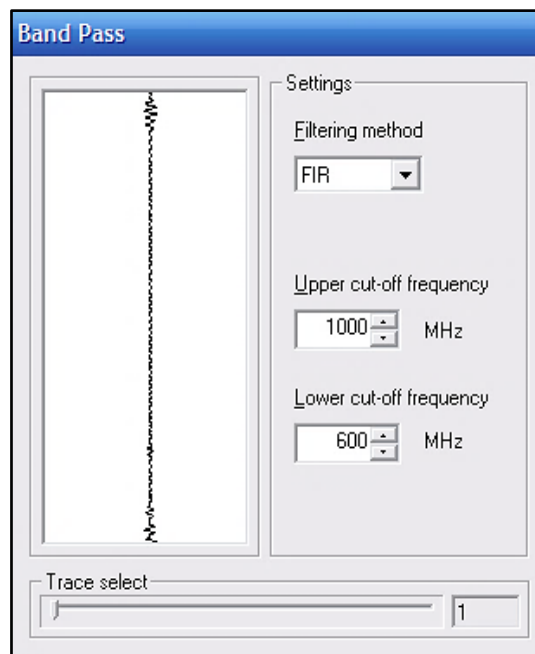


Figura 29. Ventana de aplicación de filtro pasa bandas dónde es posible especificar el método de filtrado y las frecuencias de corte. Fuente: (Ramac Groundvision, 2011).

Filtro de Control Automático de Ganancia (Automatic Gain Control)

Este filtro nos permite homogeneizar las amplitudes de nuestra señal, ajustándolas a partir de un promedio de amplitud, que es especificado a partir de ciertos parámetros que requieren ser acentuados (Figura 30). Después de la homogeneización de las amplitudes, se aplica un multiplicador constante a cada traza para que las amplitudes resultantes sean razonables.

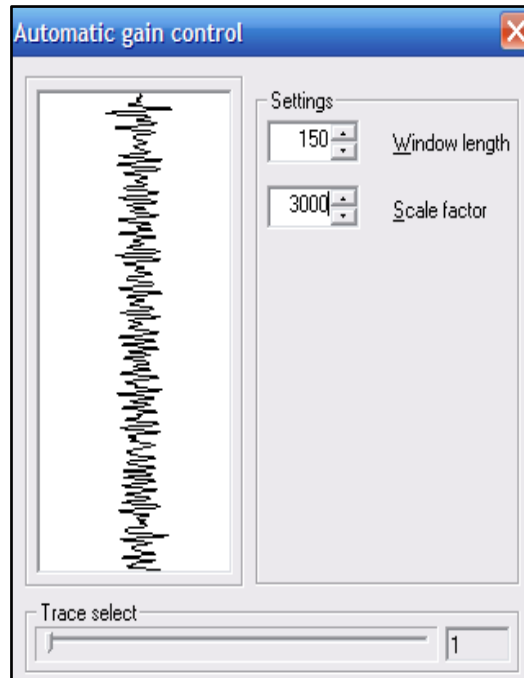


Figura 30. Filtro automático de control de ganancia. Fuente: (Ramac Groundvision, 2011).

5.3 Ultrasonido

5.3.1 Adquisición de datos de ultrasonido

El equipo utilizado para realizar las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico fue el Surfer Ultrasonic Tester UK1401, este es un instrumento portátil compacto para medir la velocidad de un pulso de ondas ultrasónicas longitudinales que se propagan dentro del concreto cercano a la superficie. El instrumento incorpora dos transductores de contacto de punto seco (DPC) que se ponen en contacto con la superficie del objeto de prueba y es posible medir la velocidad del pulso (Figura 31).

Se programó entonces la determinación de la velocidad de onda “P” in situ en igual número de sitios donde se realizarían las pruebas PIT en cada uno de los 4 apoyos, por lo que finalmente se realizaron 12 determinaciones por cada apoyo, es decir se hicieron un total de 48 pruebas de ultrasonido, las mismas que se realizaron para el PIT, como veremos más adelante (Figura 32).

Las velocidades determinadas por el ultrasonido fueron registradas en Excel y se realizó el cálculo de sus correspondientes promedios.



Figura 31. Equipo empleado en la medición de las velocidades de onda P con ultrasonido. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

5.4 PIT (Pile Integrity Test)

5.4.1 Adquisición de datos de PIT

Es importante mencionar que para la aplicación del método PIT existe una variedad de equipos para este fin; en este proyecto se utilizó un equipo inglés de la marca PET (Pile Echo Tester) Pile Test modelo Pro-USB, así como una computadora portátil, cable conector USB, martillo de mano y un acelerómetro.



Figura 32. Realización de pruebas PIT sobre uno de los apoyos del puente. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

Fueron llevadas a cabo de manera sistemática 12 pruebas de PIT en cada apoyo, 6 en cada cuerpo del puente (Figura 33). En total se realizaron un total de 48 pruebas de PIT, que estrictamente no se tenían contempladas en la evaluación del puente, pero que se decidieron realizar porque resultaban sumamente útiles, ya que de existir alguna pila o pilote en la cimentación sería posible observar sus características con el PIT.

La distribución de estos 48 puntos se hizo a partir del conocimiento de que el posible diámetro común de pilas o pilotes fuera del orden de los 40 a los 80 cm, de esta forma se estableció las distancias que se recorrer

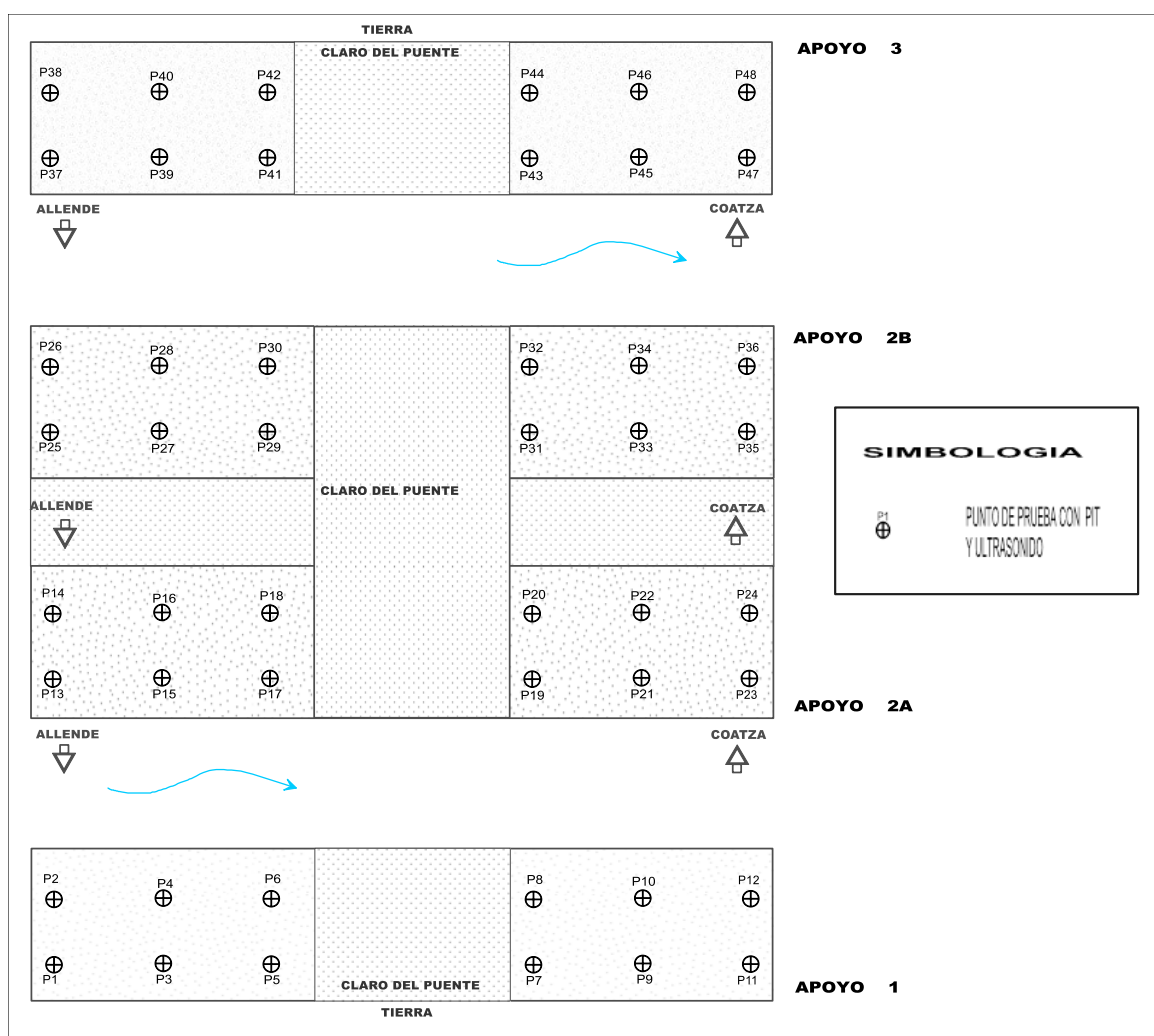


Figura 33. Croquis de exploración con Ultrasonido y PIT e información de las líneas realizadas. Fuente: Elaboración Propia.

5.2.2 Procesamiento de datos de PIT

Se utilizó el software de adquisición y procesamiento del equipo Pile Test, PET (Pile Echo Tester) para procesar cada uno de los reflectogramas obtenidos.

Es importante aclarar que el PIT es un método cualitativo, ya que este se alimenta con la información de las velocidades de onda determinadas con el ultrasonido, como veremos más adelante.

Para convertir los datos crudos adquiridos en campo con el PIT en un reflectograma aceptable y representativo, el software PET permite realizar varias operaciones que fueron aplicadas a los reflectogramas de este estudio.

Existen, por ejemplo, parámetros de presentación que automáticamente son aplicados por el software a cada uno de los reflectogramas (PET, Manual de Usuario):

- Integración: el sensor de PET contiene un acelerómetro, pero la salida gráfica presenta la velocidad de las partículas. Por esta razón, todas las señales deben convertirse de aceleración a velocidad.
- Shift-Rotate: la señal es girada y desplazada hacia el eje horizontal. Esto prepara el reflectograma para el siguiente paso.
- Normalización: la intensidad de los impactos nunca será igual, por ende, las velocidades de partículas resultante también serán diferentes. Para que el software pueda interpretar los resultados, la escala vertical se ajusta de modo que los máximos y mínimos del reflectograma ocupen todo el espacio vertical disponible.

Promedio: un reflectograma típico incluirá un componente consistente (señal) y un componente aleatorio (ruido). Como resultado, no hay dos impactos que produzcan el mismo reflectograma. El software PET, promedia automáticamente los impactos sucesivos a medida que llegan, para mejorar la relación señal/ruido.

El software de PET permite también que el usuario defina parámetros de presentación a la señal. A continuación, se muestran los parámetros aplicados a los reflectogramas de este proyecto (Figura 34):

1. Filtrado: permite eliminar el ruido de alta frecuencia y obtener una señal más suavizada. El usuario puede especificar el suavizado a partir de una escala que va desde 0 hasta 20.

Amplificación: debido a la amortiguación de la fricción, la onda de tensión se debilita a medida que avanza a lo largo de la pila. Para lograr que un reflectograma sea legible se debe compensar dicha amortiguación, generalmente de manera exponencial. En un reflectograma equilibrado, el impacto desde la parte superior y el reflejo desde la base

1. deben tener aproximadamente la misma amplitud. El usuario puede especificar en el software valores amplitud de la señal, que van desde 0 hasta 900.
2. Agudo: Agudiza o intensifica los cambios significativos en la señal.
3. Velocidad: Permite asignar la velocidad más conveniente; aquí fueron utilizadas las velocidades de onda determinadas por la prueba de ultrasonido.
4. Escala: permita cambiar la escala del gráfico arrastrando el eje hacia la derecha o izquierda, cambia la escala del gráfico arrastrando el eje de escala hacia la derecha o hacia la izquierda.

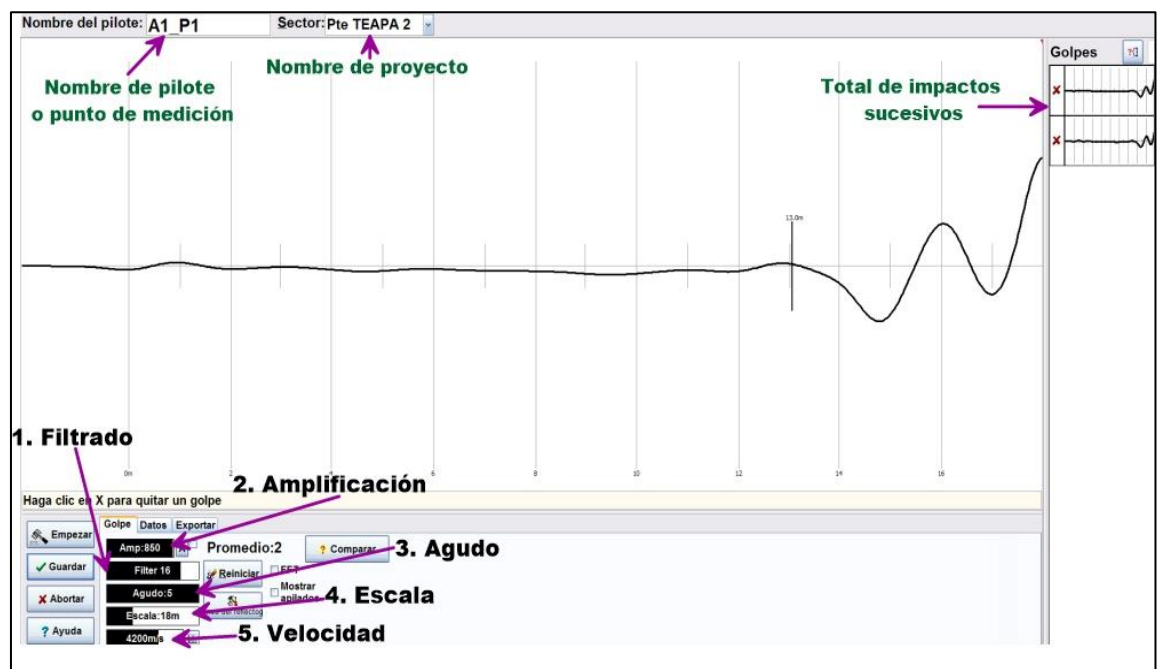


Figura 34. Reflectograma de una prueba PIT en uno de los apoyos del Puente Teapa 2; aquí es posible observar los elementos que lo conforman y las opciones de procesamiento en el software de PET. Fuente: Modificada de (Pile Echo Tester, PET, n.d.).

5.4 Sísmica de Reflexión

5.4.1 Adquisición

Dentro de las mismas pruebas programadas para este proyecto, se realizaron no sólo pruebas de ultrasonido y PIT, también se realizaron líneas de sísmica de reflexión longitudinales a la zapata para poder establecer con mejor exactitud la profundidad real de la zapata y la velocidad del concreto en esa profundidad. Se utilizó un sismógrafo de 12 canales “Geode G12”, una computadora portátil, cables, 12 geófonos de con frecuencia natural de 10 Hz, un martillo y un trigger.

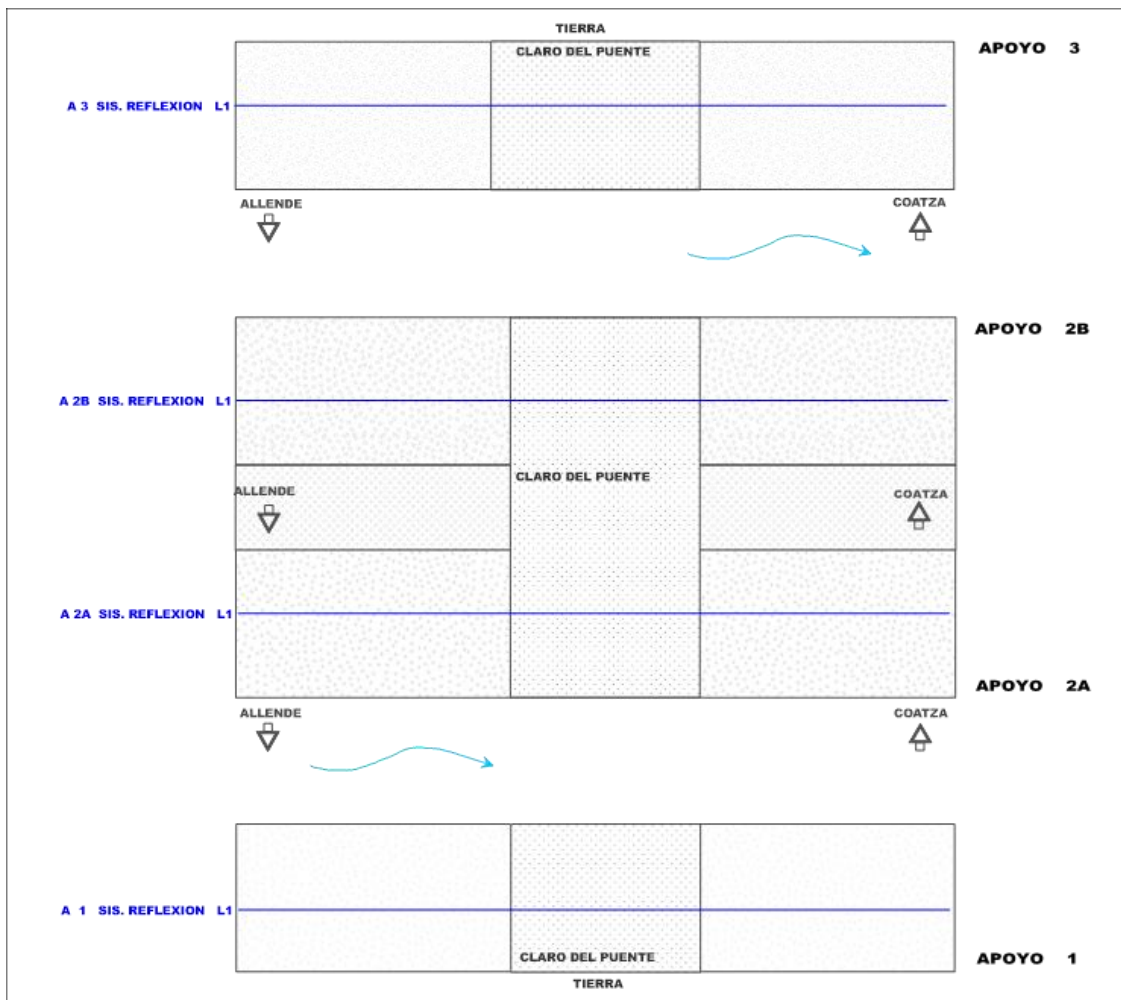


Figura 35. Croquis de exploración con las líneas de sísmica de Reflexión Fuente: Elaboración Propia.

Para cada uno de los apoyos se realizó una línea de una longitud de 27 m, constituida por 3 tendidos colineales, como se observa en la Figura 35, dónde se muestra la disposición de cada línea en los apoyos 1, 2A, 2B Y 3. Cada uno de los tendidos consta de 12 geófonos cada uno, separados a 0.75 m uno del otro y con puntos de impacto a cada 0.5 m (Figura 36), entre cada tendido existieron distancias variables que se ajustaban al tamaño de la zapata del apoyo, en total se realizaron 102 puntos de impacto.

Al igual que en las pruebas de Ultrasonido y PIT, la prueba de sísmica de reflexión se debe efectuar después de tres o cuatro semanas luego del colado, únicamente se requiere que la superficie de los apoyos por dónde se realizarán las líneas, esté bastante limpia y que los geófonos estén correctamente acoplados, esto se puede asegurar utilizando una pasta suave o gel.

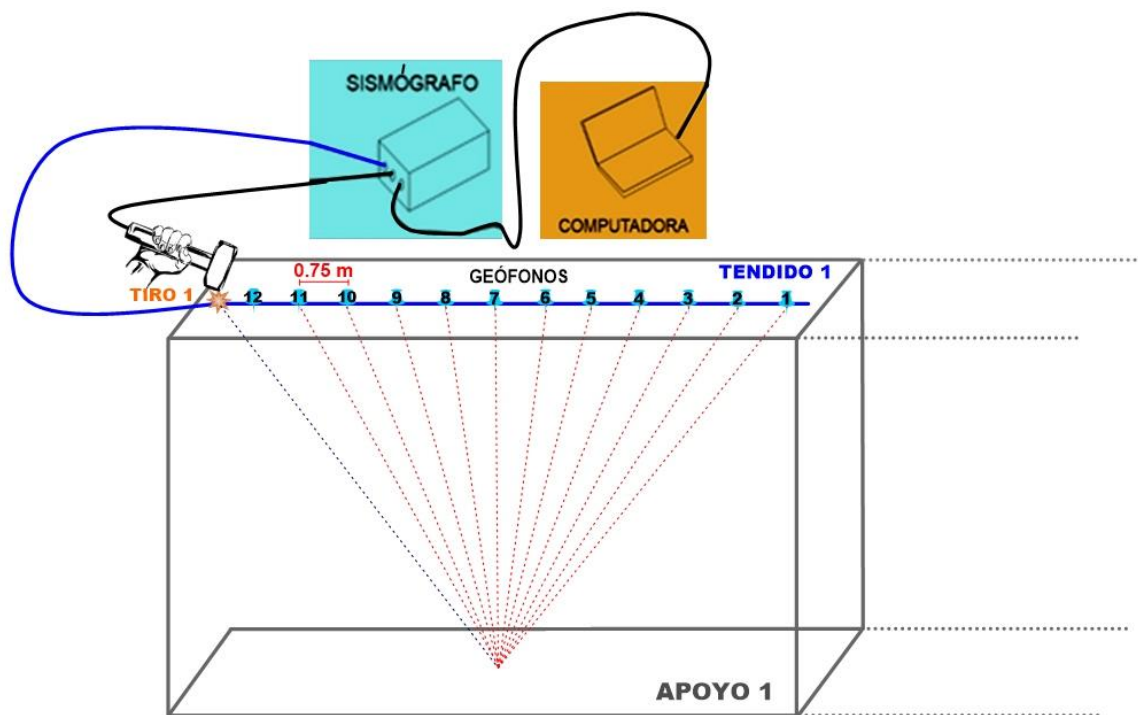


Figura 36. Tendido 1 de sísmica de reflexión sobre el Apoyo 1 del puente; se observa uno de los puntos de impacto, los doce geófonos y la separación entre ellos (0.75 m) Fuente: Elaboración Propia.

5.4.2 Procesamiento de datos

Para el método de sismica de reflexión para estructuras de concreto, al igual que para pilas, se realiza la evaluación a través de la identificación y el análisis del tiempo de viaje y la amplitud de las reflexiones medidas por el geófono en el dominio del tiempo. Para el procesamiento se utilizó el software de adquisición y procesamiento GeoTom, LLC con un software complementario de selección de tiempo llamado Tom Time.

Este programa permite cargar los archivos *.dat* del sismógrafo, que corresponden a cada uno de los sismogramas del estudio y también posibilita seleccionar las trazas que sean de nuestro interés. También contiene características para ayudar a obtener selecciones de tiempo y amplitudes precisas, incluso en datos ruidosos, a través de la superposición de trazas y de opciones versátiles de filtrado y visualización.

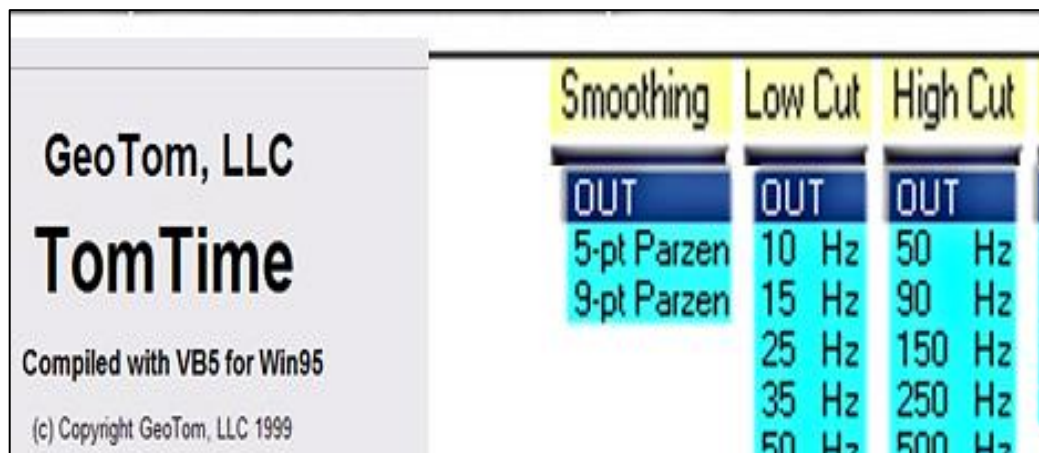


Figura 37. Ventana del software Tom Time, GeoTom LLC donde es posible observar cada una de las herramientas que nos proporciona el programa para el procesado de sismogramas. Fuente: (Tom Time, 2010).

En la Figura 37 se muestran las opciones de filtrado que ofrece Tom Time; se puede aplicar suavizado con filtros Parzen, filtros de frecuencia de corte bajo de 10 Hz a 400 Hz, filtros de frecuencia de corte alto de 50 Hz a 1000 Hz y filtro Notch. Los espectros de frecuencia para combinaciones de trazas individuales y seleccionadas se pueden generar para ayudar a decidir qué filtros usar y estimar las longitudes de onda. Los espectros de frecuencia se pueden guardar en un archivo para descomposición espectral en investigaciones de atenuación.

Después de realizar el procesamiento de cada uno de los sismogramas, se procedió al cálculo de las velocidades y de la longitud de la estructura de concreto basándonos en las ecuaciones

1.70 y 1.71, aunque en este caso no será necesario determinar la velocidad de la onda directa por no tratarse de una pila o pilote.

Se analizan entonces las últimas trazas del Tendido 1, correspondientes al geófono 10, 11, y 12 con el Tiro 1, para el cálculo de la velocidad se toman en cuenta los tiempos de arribo registrados por estos geófonos y la distancia a la que estos se encuentran separados, que en este caso es de 0.75 m. El geófono más cercano es el 12 e indica un tiempo de 7.813 ms, el geófono 11 un tiempo de 7.906 ms y el geófono 10, el más alejado del punto de impacto, un tiempo de 8.219 ms. A partir de estos datos es posible determinar una velocidad de 3694.58 m/s y después de esto, procedemos al cálculo de la profundidad a partir de la ecuación 1.70, como se observa en la Figura 38; a partir del tiempo de arribo en el geófono 12, la velocidad de onda P y la distancia entre geófonos, es posible estimar que la estructura tiene una longitud de 14.43 m.

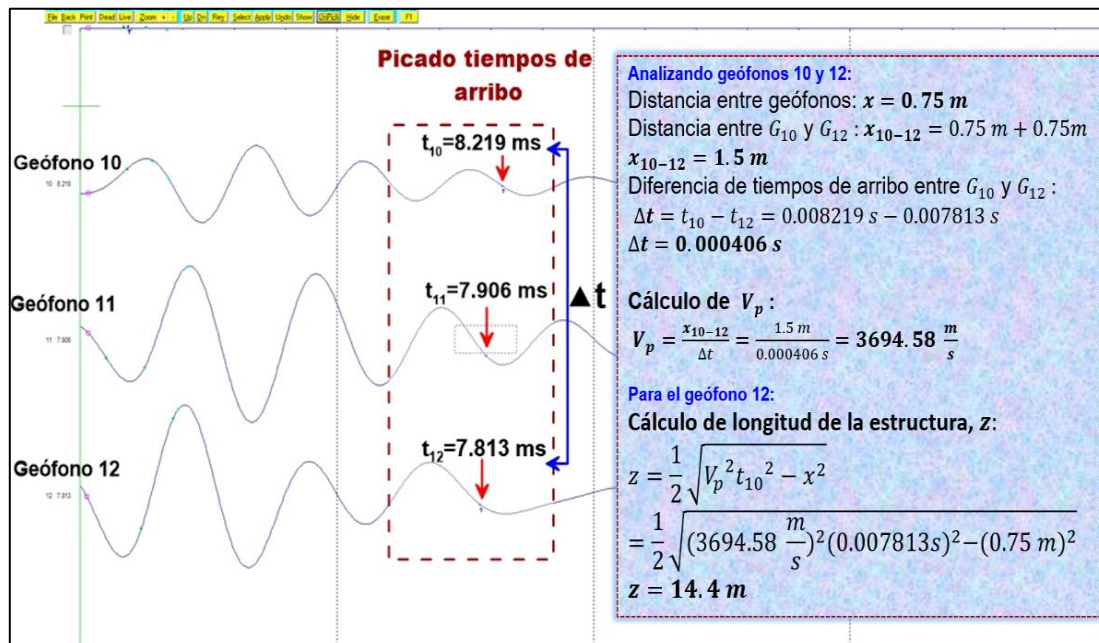


Figura 38. Análisis en los geófonos 10, 11 y 12, del Apoyo 1, Tendido 1, Tiro 1 y cálculo de V_p y la longitud de la estructura de cimentación. Fuente: Elaboración propia.

Las operaciones para cálculo de profundidad se realizan para las tres trazas correspondientes, y se obtienen profundidades específicas que analizaremos a fondo en la integración de resultados de sísmica de reflexión. Los sismogramas obtenidos y los cálculos determinados a partir de ellos indican que la estructura es continua y que no es posible observar algún signo de existencia de las “posibles pilas y/o pilotes” en la cimentación.

Tabla 4. Datos determinados a partir de los tiempos de arribo para los geófonos 10, 11,12, del Tendido 1 con punto de impacto 1.

| Geófono | Distancia entre geófonos | Tie. O. Reflex | Vel. Onda P calculada | Profundidad determinada |
|----------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| No. | (m) | (seg) | (m/s) | (m) |
| 10 | 0.75 | 0.008219 | 3694.581 | 15.18 |
| 11 | 0.75 | 0.007906 | 3694.581 | 14.60 |
| 12 | 0.75 | 0.007813 | 3694.581 | 14.43 |

6. Integración de Resultados

En este estudio fue de vital importancia el orden de aplicación de los métodos geofísicos en campo, ya que a partir de dicho proceso se fueron tomando decisiones acerca de la forma de aplicación de las siguientes técnicas, con el fin de cumplir con el objetivo del estudio: la caracterización de la cimentación del puente Teapa 2.

A continuación, se mostrará de forma integrada cada uno de los resultados obtenidos, por orden de aplicación, de los métodos geofísicos para los cuatro apoyos del puente.

6.1 Apoyo 1

Resultados del GPR

Este apoyo fungió como “apoyo de prueba”, ya que en este se realizaron las líneas de prueba para la calibración del equipo y la definición de los parámetros de adquisición a partir de las propiedades del material de dicha estructura.

De este apoyo se obtuvieron 3 radargramas (Anexo B), correspondientes a las líneas A1L1 de 26.65 m, A1 L2 de 26.75 m y la A1 L3 de 26.65 m. Analicemos entonces el radargrama de la Figura 39, correspondiente a la línea A1 L2 (en el Anexo B se pueden consultar todos los radargramas obtenidos en este estudio); lo primero que es posible observar es que debido a que la antena utilizada en el levantamiento fue la de 800 MHz, nuestra profundidad de penetración fue de 4.5 m aproximadamente, y que hasta este punto de investigación no es posible percatarnos de alguna anomalía en la señal que indique la presencia de la parte superior de alguna pila y/o pilote, más bien es posible definir que la estructura presenta cierta continuidad hasta esta profundidad. A los 2.7 m se indica el nivel de agua del arroyo, que fue medido previamente en campo y que efectivamente es posible observar en el radargrama a partir de un ligero cambio en la señal debido a la presencia del tirante de agua. También es posible identificar a partir de los 2 m una “zona de humedecimiento” que corresponde a la infiltración del agua en el concreto, resultado de las constantes variaciones del nivel del agua del arroyo a lo largo del tiempo; la clara atenuación de la señal en esta zona nos indica que la presencia de agua en el concreto contribuye a la reducción en la calidad de este, ya que, en caso contrario, si el concreto se encontrara en mejores condiciones la señal sería mucho más

clara e intensa, como se puede observar en los primeros metros del perfil; en esta parte más superficial del apoyo, a partir de los primeros 0.5 m se pueden observar anomalías con una forma de rizadura, que generalmente están asociadas a la presencia de armado metálico o varillas de acero y también es posible detectar algunas zonas en color amarillo que pueden estar relacionadas con la presencia de agua dentro del concreto que conforma a esta parte superior de la zapata. Por debajo de esta zona, es posible percibir algunas anomalías dentro del concreto que posiblemente estén ligadas a heterogeneidades en este, asociado posiblemente a un colado deficiente que con el tiempo y la presencia del agua se ha vuelto mucho más evidentes.

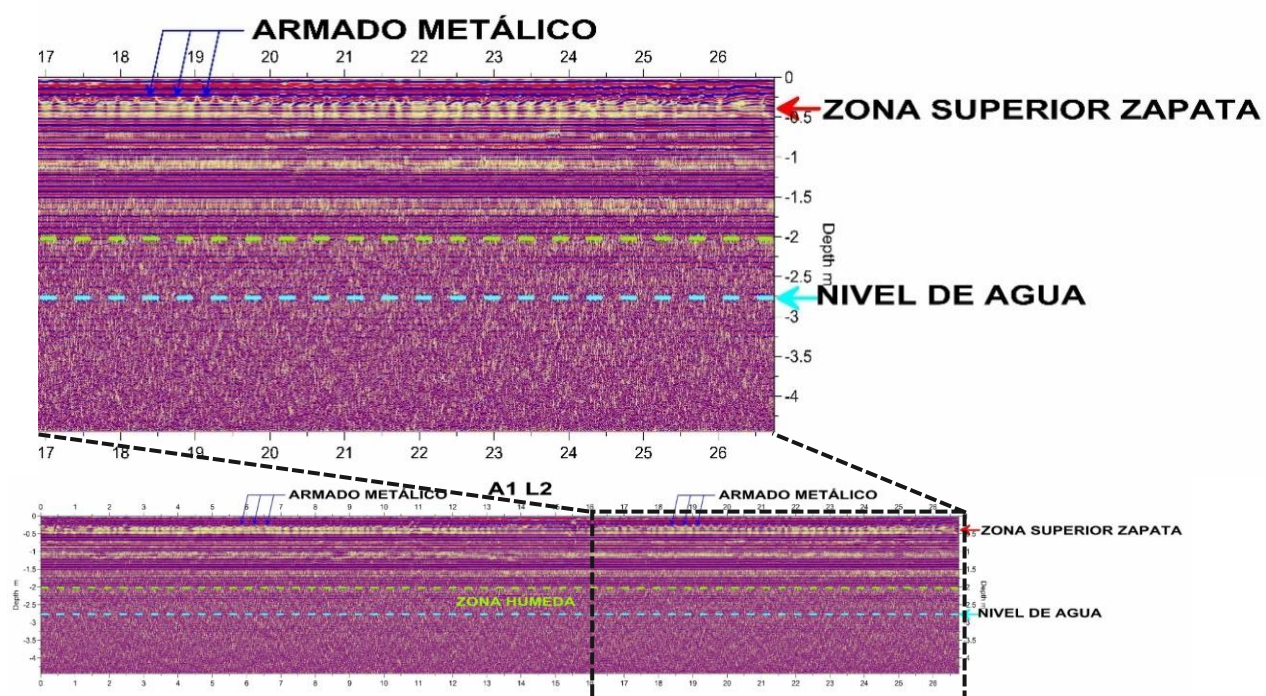


Figura 39. Radargrama correspondiente a la línea A1 L2 del Apoyo 1. Fuente: Elaboración propia.

Resultados del Ultrasonido y el PIT

Después de haber determinado a través de los radargramas del Apoyo 1, que dicha estructura presenta continuidad en los primeros metros explorados y que no es posible observar aún la presencia de pilas y/o pilotes, se procedió a la interpretación de los resultados del Ultrasonido y la Prueba de Integridad de Pilotes (PIT) y se obtuvo lo siguiente:

En la Tabla 5 se encuentran cada uno de los valores determinados en los puntos de medición del Ultrasonido y el PIT; estas pruebas se realizaron en los mismos puntos, ya que recordemos que la velocidad de la onda definida a partir del método de Ultrasonido es asignada al PIT para el procesamiento del reflectograma. En este caso se tomaron dos mediciones de velocidad en cada punto con el Ultrasonido, se calculó un promedio de ellas y el resultado fue la velocidad asignada para la aplicación de la prueba PIT; los valores de dichas velocidades oscilan entre los 2950 m/s y los 4400 m/s y a partir de ellas también fue posible realizar la clasificación de la calidad del concreto según (Malhotra V. , 1985).

Tabla 5. Valores determinados a través del análisis de resultados del método de Ultrasonido y PIT para el Apoyo 1. Fuente: Elaboración Propia.

| APOYO 1 | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Punto de medición PIT y Ultrasonido | A1_P1 | A1_P3 | A1_P5 | A1_P7 | A1_P8 | A1_P9 | A1_P10 | A1_P11 | A1_P12 | A1_P13 | A1_P14 | A1_P15 | A1_P16 | A1_P17 |
| Velocidad Ultrasonido (m/s) | 4270 | 4050 | 3920 | 4210 | 3700 | 3590 | 2600 | 3790 | 3300 | 3070 | 3550 | 4250 | 3850 | 4270 |
| | 4180 | 4410 | 3940 | 3810 | 4070 | 3460 | 2980 | 3500 | 3600 | 3780 | 3160 | 4130 | 4140 | 4230 |
| Velocidad Ultrasonido Promedio (m/s) | 4225 | 4230 | 3930 | 4010 | 3885 | 3525 | 2790 | 3645 | 3450 | 3425 | 3355 | 4190 | 3995 | 4250 |
| Velocidad asignada PIT (m/s) | 4200 | 4400 | 4000 | 4200 | 3850 | 2950 | 2950 | 3650 | 4250 | 3450 | 4250 | 4250 | 3850 | 4000 |
| Clasificación del concreto (Leslie y Cheesman, 1949) | <i>B</i> | <i>B</i> | <i>B</i> | <i>B</i> | <i>B</i> | <i>P</i> | <i>P</i> | <i>B</i> | <i>B</i> | <i>R</i> | <i>B</i> | <i>B</i> | <i>B</i> | <i>B</i> |
| Profundidad Estimada (m) | 13 | 12.4 | 12.2 | 13 | 13.6 | 13.7 | 13.5 | 13.9 | 13 | 13.1 | 13 | 13.2 | 13.4 | 13.7 |

Procedemos ahora al análisis de uno de los reflectogramas (promedio de la respuesta de dos impactos) del Apoyo 1, correspondiente al Punto 1 (P1) de medición de Ultrasonido y PIT, de ahí la nomenclatura A1_P1 (Figura 40). Como se mencionó, el PIT es un método cualitativo debido a que se le asigna una velocidad de onda previamente definida con el Ultrasonido, que en este caso fue de 4200 m/s; en este reflectograma es posible observar una clara reflexión a los 13 metros de profundidad, que puede estar asociada al contacto de la base de la estructura que funge como cimiento y el material que conforma a un estrato del suelo.

En el reflectograma no es posible observar alguna respuesta típica relacionada con la presencia de una pila y/o pilote, entonces podemos establecer entonces que se trata de una

estructura que presenta continuidad hasta cierta profundidad, es decir, “una gran zapata” de cimentación con una profundidad de alrededor de 13 metros y conformada con un concreto de “Buena Calidad” según (Malhotra V. , 1985).

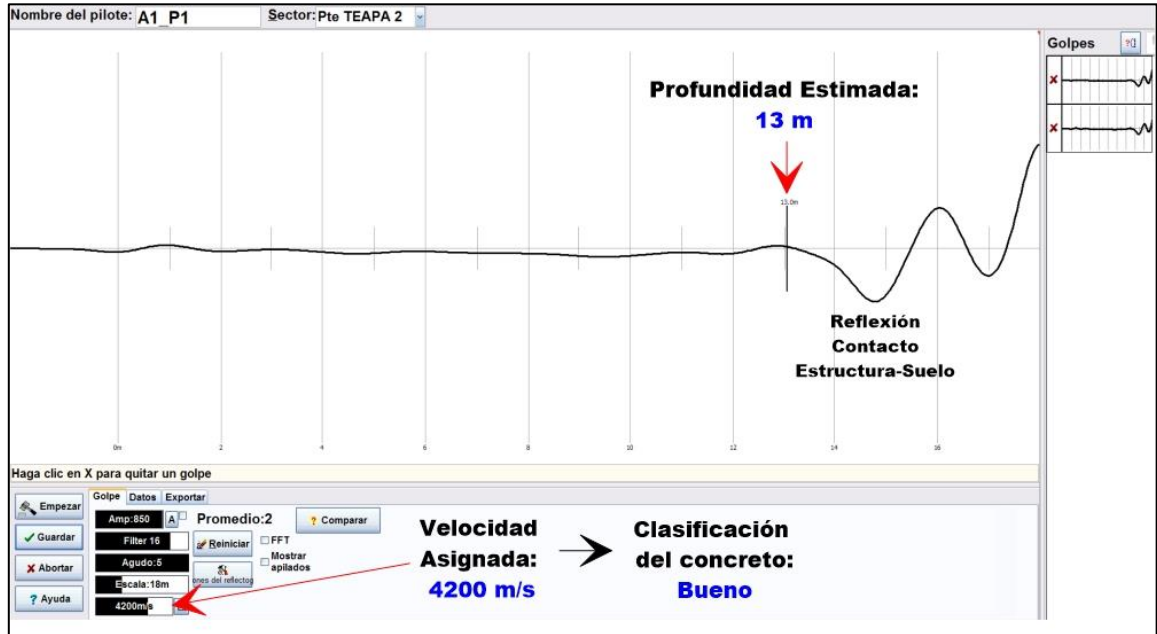


Figura 40. Registro obtenido de la prueba PIT del punto A1_P1 que corresponde al Apoyo 1 del puente.

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente fase consistió en analizar y respaldar estas aseveraciones acerca de la estructura, la geometría y el estado del material con la Sísmica de Reflexión.

Resultados de Sísmica de Reflexión

Recordemos que fueron realizadas líneas de 27 m, constituidas por 3 tendidos colineales de 12 geófonos, con una separación de 0.75 m, para cada uno de los apoyos del puente; considerando que, de existir pilotes de cimentación, los cuáles comúnmente tienen de 40 a 80 cm de diámetro para este tipo de estructura (INIFIED, 2015), podíamos garantizar a través de las características de estas líneas de sísmica, poder observar alguna pila y/o pilote.

Tabla 6. Resultado de la sísmica de reflexión para Apoyo 1. Fuente: Elaboración propia.

| APOYO | Tendido | Punto de Impacto o Tiro | Geófono | Distancia entre geófonos | Tie. O. Reflex | Vel. Onda P calculada | Clasificación (Leslie y Cheesman, 2000) | Profundidad determinada |
|----------|---------|-------------------------|---------|--------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| | | | No. | (m) | (seg) | (m/s) | | (m) |
| 1 | 1 | 1 | 10 | 0.75 | 0.008219 | 3694.581 | <i>Bueno</i> | 15.18 |
| | | | 11 | 0.75 | 0.007906 | 3694.581 | | 14.60 |
| | | | 12 | 0.75 | 0.007813 | 3694.581 | | 14.43 |
| | 3 | 35 | 3 | 0.75 | 0.007281 | 4010.695 | <i>Bueno</i> | 14.60 |
| | | | 4 | 0.75 | 0.007094 | 4010.695 | | 14.22 |
| | | | 5 | 0.75 | 0.007594 | 4010.695 | | 15.22 |
| | | | 6 | 0.75 | 0.007781 | 4010.695 | | 15.60 |

En la Tabla 6 se analizan dos de los tendidos que conforman a la línea de sísmica de reflexión realizada sobre el Apoyo 1, dónde a partir de las distancias y los tiempos de reflexión fue posible determinar valores para la velocidad de onda P y con base a dicho valor se asignó una clasificación de calidad para el concreto y también se calcularon profundidades para la estructura a partir del proceso mostrado con anterioridad en uno de los apartados de este trabajo (Figura 38). En el Tendido 1 con punto de impacto 1, realizando el análisis para las trazas correspondientes a los geófonos 10,11 y 12 se obtuvo, a partir de los tiempos de reflexión, una velocidad de 3694.581 m/s, que según (Leslie & Cheesman, 1949) está asociada a una calidad de concreto “Bueno”; la profundidad calculada varía entre los 14.43 m y 15.18 m. Para el Tendido 3, con punto de impacto 35 y las trazas de los geófonos 3, 4, 5 y 6, se obtuvo una velocidad de 4010.695 m/s, un concreto “Bueno” y profundidades entre los 14.22 m y 15.60 m, esto nos indica que posiblemente a estas profundidades se encuentre el contacto suelo-estructura.

6.2 Apoyo 2A

Resultados del GPR

Continuando con el análisis de los resultados, se prosiguió a interpretar los radargramas realizados en el Apoyo 2A, que constituye a una de las caras del Apoyo Central que se orienta hacia Allende; de aquí se obtuvieron 2 radargramas (Anexo B) correspondientes a las líneas A2A L1 Y A2A L2, ambas de 26.70 m de longitud. En la Figura 41 es posible observar el perfil de la línea A2A L2, en dónde podemos percibir que se presenta algo muy similar a lo obtenido en el radargrama del apoyo anterior; es posible observar la señal hasta una

profundidad somera de 4.5 m, hasta los 2.7 m se identifica el nivel del agua del arroyo al momento de la medición, en esta zona es posible observar que en la señal se refleja la injerencia del agua en la estructura; también es identificada la “zona de humedecimiento y/o infiltración”, aproximadamente a los 2 m, se observa de nuevo una atenuación de la señal producto de la presencia de agua en el concreto, lo que indica que probablemente existe una reducción en la calidad de este material.

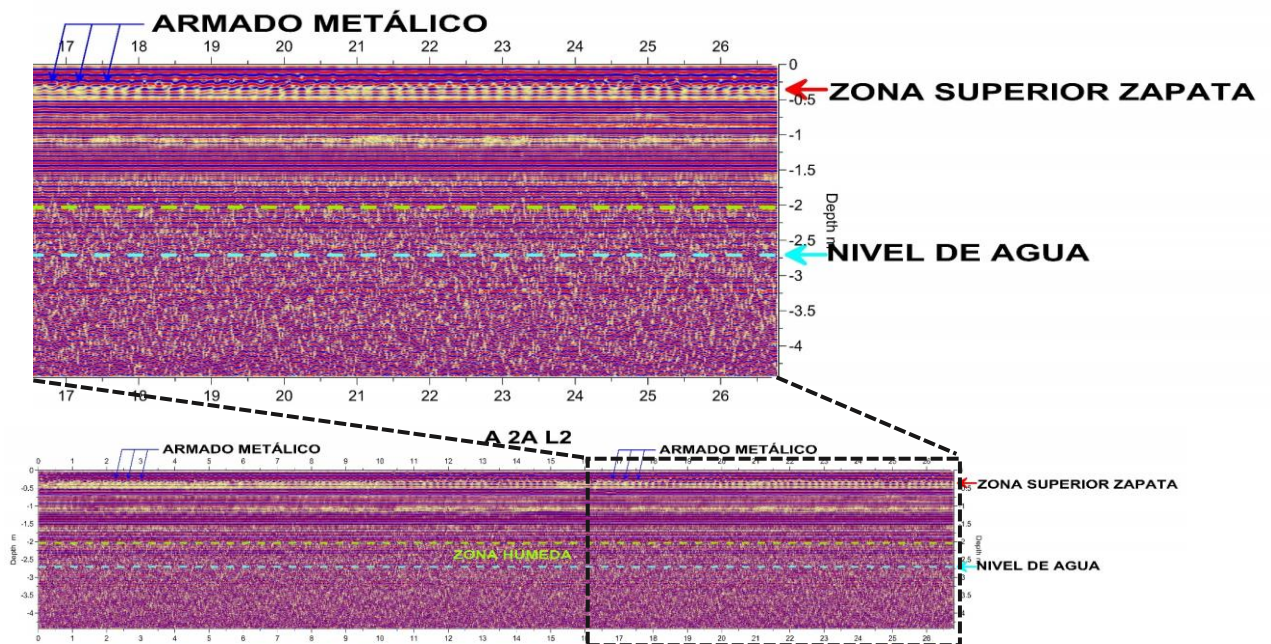


Figura 41. Radargrama correspondiente a la línea A2A L2 del Apoyo 2A. Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior del radargrama, entre los 0.3 y 0.5 m, se presentan anomalías con forma de rizadura, producto de la presencia del armado metálico o varillas de acero de la zona superior de la zapata. Se observan también zonas donde hay una especie de color amarillento que corresponden a alta presencia de agua dentro del concreto.

Resultados del Ultrasonido y el PIT

En la Tabla 7 podemos observar todos los puntos de medición del Ultrasonido y el PIT en el Apoyo 2A; se tomaron dos mediciones de velocidad por punto con el Ultrasonido, se calculó un promedio de ellas y a partir de esto, se determinó una velocidad que fue asignada al PIT, esta velocidad oscila entre los 3300 m/s y los 4200 m/s; a partir de esto se realizó la clasificación de calidad del concreto de “Regular” a “Bueno”, (Malhotra V. , 1985).

Tabla 7. Valores determinados a través del análisis de resultados del método de Ultrasonido y PIT para el Apoyo 2A. Fuente: Elaboración Propia.

| Punto de medición PIT y Ultrasonido | A2A_P22 | A2A_P24 | A2A_P26 | A2A_P27 | A2A_P28 | A2A_P29 | A2A_P30 | A2A_P31 |
|------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Velocidad Ultrasonido (m/s) | 3570 | 3820 | 4200 | 3690 | 3960 | 4600 | 4230 | 3750 |
| | 4120 | 4260 | 4100 | 3490 | 3850 | 3940 | 4210 | 3510 |
| Velocidad Ultrasonido Promedio (m/s) | 3845 | 4040 | 4150 | 3590 | 3905 | 4270 | 4220 | 3630 |
| Velocidad asignada PIT (m/s) | 3850 | 4000 | 4200 | 3300 | 4050 | 3500 | 4200 | 3600 |
| Clasificación del concreto (Leslie y Cheesman, 1949) | B | B | B | R | B | R | B | R |
| Profundidad Estimada (m) | 13.5 | 13.3 | 13.1 | 13.5 | 13 | 13.7 | 13.6 | 13 |

Por medio del análisis de los reflectogramas fue posible estimar la profundidad de la estructura que funge como cimiento del puente. En la Figura 42 se observa uno de los reflectogramas (promedio de la respuesta de dos impactos) del Apoyo 2A correspondiente al Punto 22 (P22) con nomenclatura A2A_P22. A partir de la velocidad que fue determinada con el Ultrasonido se asignó una velocidad de 3850 m/s para este punto, de esta forma alrededor de los 13.5 m de “profundidad estimada” no es posible observar algún comportamiento en la señal que nos indique la presencia de pilotes, lo que corrobora lo anteriormente observado en el radargrama del apoyo.

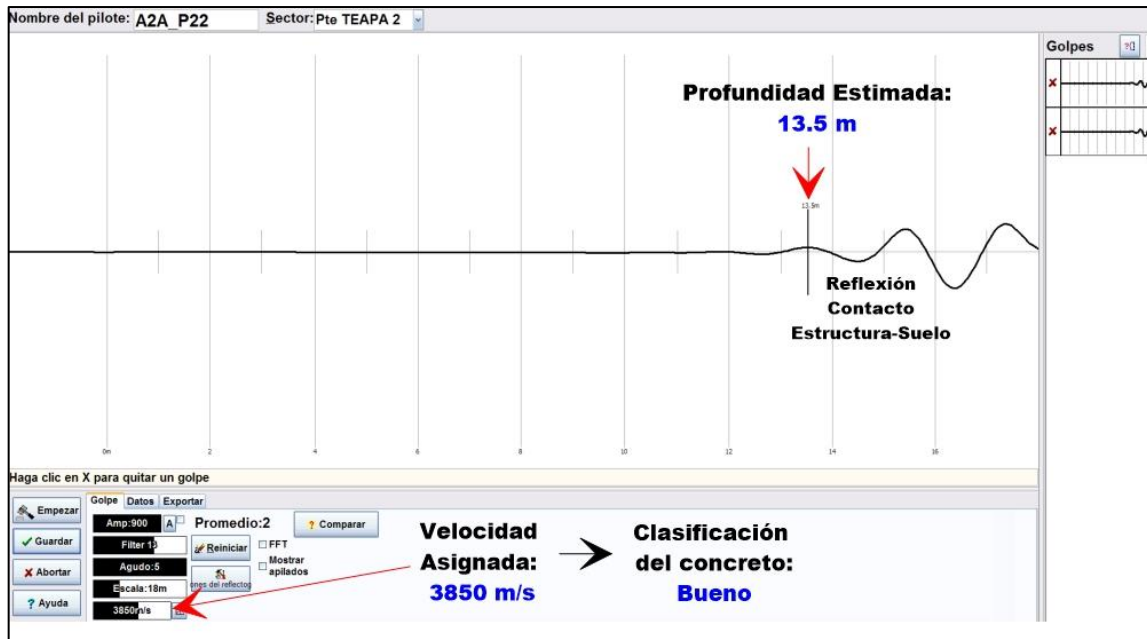


Figura 42. Registro obtenido de la prueba PIT del punto A2A_P22 que corresponde al Apoyo 2A del puente.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de Sísmica de Reflexión

En este apoyo se analizó el Tendido 1, con el punto de impacto 40 y las trazas correspondientes a los geófonos 10, 11, 12 donde se obtuvo una velocidad de onda de 4000 m/s asociado a un concreto “Bueno” según la clasificación de (Leslie & Cheesman, 1949) y una profundidad entre los 12.50 m y 13.24 m; también se inspeccionó el Tendido 3, con punto de impacto 57 y las trazas de los geófonos 5, 6, 7 y 8; aquí la velocidad calculada fue de 4010.695 m/s, por ende con una clasificación de concreto “Bueno” y las profundidades obtenidas varían entre 12.72 m y 13.78 m.

Tabla 8. Resultados de la sísmica de reflexión para Apoyo 2A. Fuente: Elaboración propia.

| APOYO | Tendido | Punto de Impacto o Tiro | Geófono | Distancia entre geófonos | Tie. O. Reflex | Vel. Onda P calculada | Clasificación (Leslie y Cheesman, 2000) | Profundidad determinada |
|-----------|---------|-------------------------|---------|--------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| | | | No. | (m) | (seg) | (m/s) | | (m) |
| 2A | 1 | 40 | 10 | 0.75 | 0.006625 | 4000.000 | Bueno | 13.24 |
| | | | 11 | 0.75 | 0.006594 | 4000.000 | | 13.18 |
| | | | 12 | 0.75 | 0.006250 | 4000.000 | | 12.49 |
| | 3 | 57 | 5 | 0.75 | 0.006531 | 4010.695 | Bueno | 13.09 |
| | | | 6 | 0.75 | 0.006344 | 4010.695 | | 12.72 |
| | | | 7 | 0.75 | 0.006688 | 4010.695 | | 13.41 |
| | | | 8 | 0.75 | 0.006875 | 4010.695 | | 13.78 |
| | | | | | | | | |

6.3 Apoyo 2B

Resultados del GPR

Este apoyo forma parte del Apoyo Central, correspondiente a la cara que da hacia Coatzacoalcos. Aquí se obtuvieron 2 radargramas (Anexo B) de las líneas A2B L1 de 26.15 m (Figura 43) y A2B L2 de 26.05 m. De nuevo podemos percatarnos que la profundidad a la que se logró penetrar es alrededor de los 4.5 m; hasta los 2.7 m se indica hasta donde llega el nivel del agua al momento de la medición, también desde este punto y hasta los 2 m aún es posible identificar una “zona de humedecimiento” resultado de la infiltración del agua del arroyo dentro de la estructura, lo cual podría verse reflejado en la calidad del concreto, como podrá verificarse con los resultados del Ultrasonido y la Sísmica de Reflexión.

En la zona más superficial es posible ver una respuesta más homogénea del concreto, pero en este caso se pueden percibir algunas anomalías con una forma de rizadura, producto de la presencia de armado metálico y en efecto, existen algunas zonas en color amarillento que se pueden relacionar con la presencia de agua dentro del mismo. Sin embargo, en estos primeros metros explorados con el georadar, aún no es posible hallar alguna anomalía que esté asociada a la presencia de la parte superior de alguna pila y/ o pilote, asunción que podríamos confirmar con los métodos siguientes.

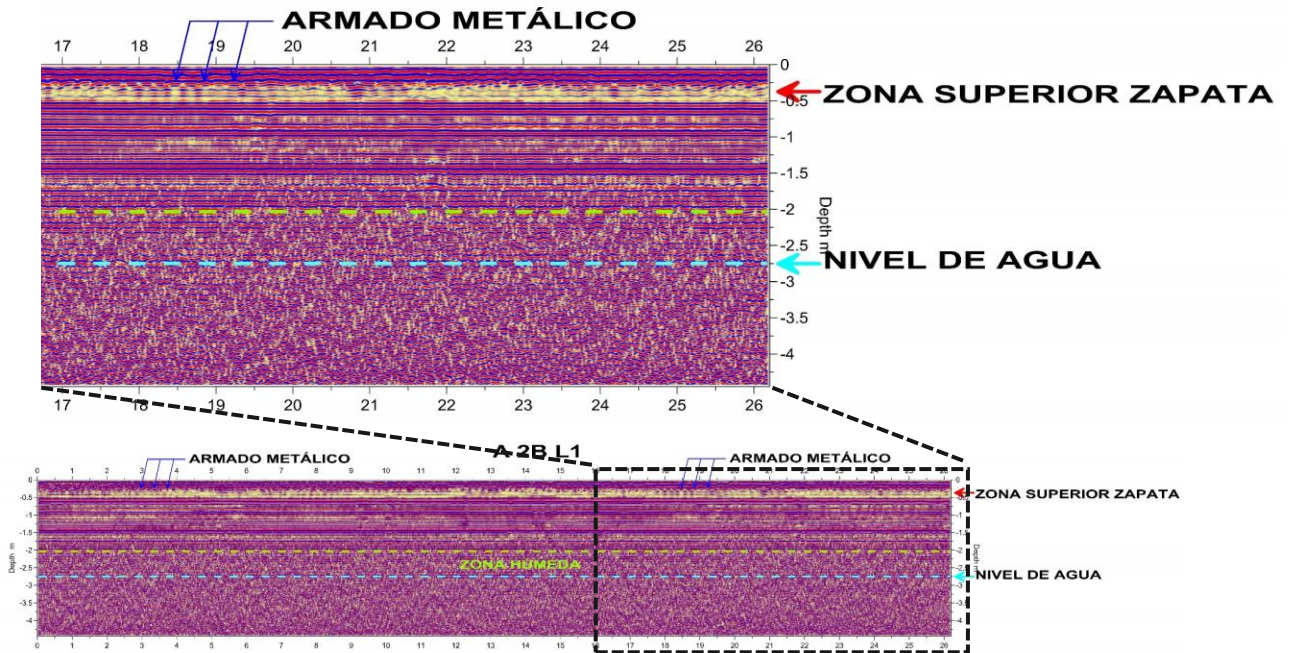


Figura 43. Radargrama de la línea A 2B L1, que forma parte del apoyo central. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de Ultrasonido y PIT

Las pruebas de PIT y Ultrasonido se realizaron de la misma forma en el Apoyo 2B: mismos puntos y las velocidades obtenidas con el Ultrasonido fueron asignadas para realizar el procesamiento de los reflectogramas del PIT. En la Tabla 9 podemos analizar cada uno de los valores de velocidad determinados y promediados para alimentar al PIT; dichas velocidades oscilan entre los 3350 m/s y los 4200 m/s y a su vez se realizó la clasificación de calidad del concreto (Malhotra V. , 1985) de “Regular” a “Bueno”, que se puede deber a la presencia de heterogeneidades en el material debido a su exposición a distintos factores o por un colado deficiente.

Tabla 9. Valores determinados a través del análisis de resultados del método de Ultrasonido y PIT para el Apoyo 2B. Fuente: Elaboración Propia.

| APOYO 2B | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Punto de medición PIT | A2B_P33 | A2B_P35 | A2B_P37 | A2B_P38 | A2B_P39 | A2B_P40 | A2B_P41 | A2B_P42 |
| Velocidad Ultrasonido (m/s) | 4170 | 4190 | 3860 | 3970 | 4270 | 4320 | 4190 | 4080 |
| | 4030 | 4400 | 3930 | 3950 | 4180 | 4370 | 4170 | 4020 |
| Velocidad Ultrasonido Promedio (m/s) | 4100 | 4295 | 3895 | 3960 | 4225 | 4345 | 4180 | 4050 |
| Velocidad asignada PIT (m/s) | 4000 | 4200 | 3650 | 3750 | 3800 | 3350 | 4000 | 3550 |
| Clasificación del concreto (Leslie y Cheesman, 1949) | B | B | R | B | B | R | B | R |
| Profundidad Estimada (m) | 13.6 | 12.9 | 13.3 | 13.6 | 13.2 | 13.9 | 13.3 | 13.8 |

Por ejemplo, en la Figura 44 podemos observar uno de los reflectogramas (promedio de la respuesta de cuatro impactos) del Apoyo 2B correspondiente al Punto 42 (P42) con nomenclatura A2B_P42. A partir de la velocidad determinada con el Ultrasonido, se le asigna una velocidad de 3550 m/s al PIT y se estima una profundidad de la estructura de 13.8 m, debido a las claras reflexiones asociadas al contacto de la base de la estructura con el suelo. También por simple inspección visual del reflectograma, al no observar alguna respuesta relacionada con la presencia de una pila y/o pilote, podemos deducir que se trata de una “gran zapata” de cimentación por la continuidad que presenta hasta esta profundidad y que está conformada con un concreto de calidad “Regular” según (Malhotra V. , 1985).

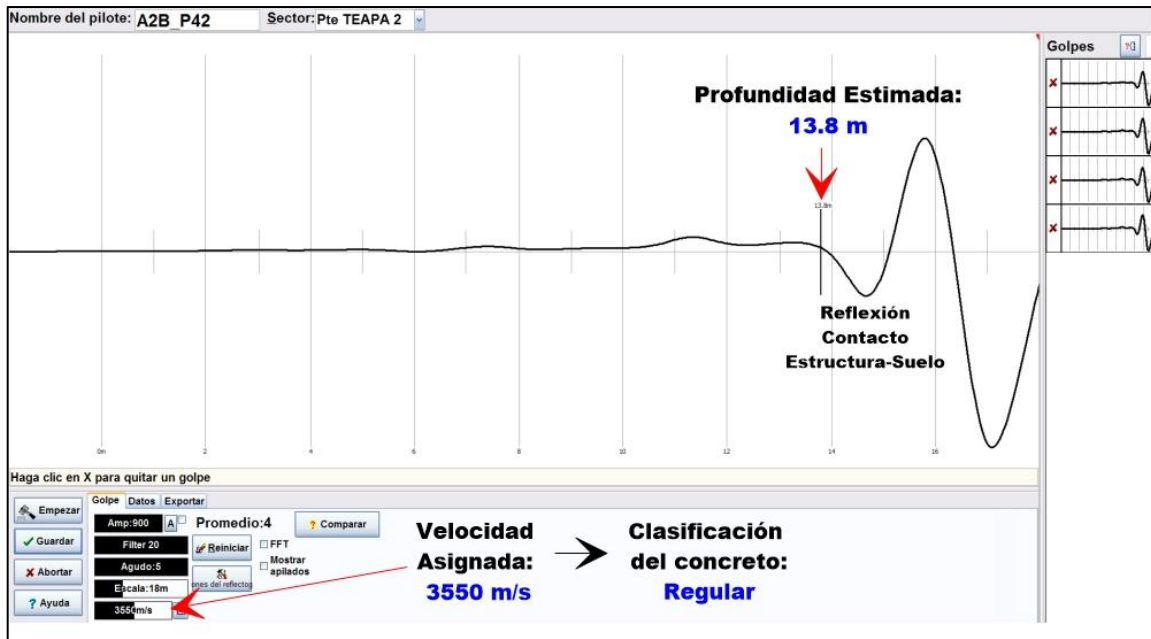


Figura 44. Registro obtenido de la prueba PIT del punto A2B_P42 que corresponde al Apoyo 2B del puente.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de Sísmica de Reflexión

Con la finalidad de constatar la idea de que la estructura de cimentación del Apoyo Central es una zapata continua con una profundidad del orden de 14 a 15 m, se procedió a analizar la línea de Sísmica de Reflexión en el Apoyo 2B, esta se constituyó de 3 tendidos colineales de 12 geófonos, separados a 0.75 m cada uno.

En la Tabla 10 se analiza el Tendido 1, con punto de impacto 62 y las trazas que corresponden a los últimos geófonos 9, 10, 11, 1 y 12; dónde a partir de las distancias y los tiempos de reflexión fue posible determinar un valor de velocidad de 3989.362 m/s, ligado a un concreto de “Buena” calidad y también se calcularon profundidades para la estructura que varían entre 14.46 m y 15.77 m. En el caso del Tendido 3, con punto de tiro 75 y analizando las trazas de los geófonos 10, 11, 12 se obtuvo una velocidad de 4000 m/s asociada, de la misma forma, a un concreto “Bueno” y profundidades entre 14.93 m y 154.68 m, lo que nos indica que efectivamente no hay presencia de alguna pila y/o pilote y que la zapata es continua hasta estas profundidades, en dónde hallamos el contacto suelo-estructura.

Tabla 10. Resultados de la sísmica de reflexión para Apoyo 2B. Fuente: Elaboración propia.

| APOYO | Tendido | Punto de Impacto o Tiro | Geófono | Distancia entre geófonos | Tie. O. Reflex | Vel. Onda P calculada | Clasificación (Leslie y Cheesman, 2000) | Profundidad determinada |
|-----------|---------|-------------------------|---------|--------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| | | | No. | (m) | (seg) | (m/s) | | (m) |
| 2B | 1 | 62 | 9 | 0.75 | 0.007438 | 3989.362 | Bueno | 14.83 |
| | | | 10 | 0.75 | 0.00725 | 3989.362 | | 14.46 |
| | | | 11 | 0.75 | 0.007719 | 3989.362 | | 15.39 |
| | | | 12 | 0.75 | 0.007906 | 3989.362 | | 15.77 |
| | 3 | 75 | 10 | 0.75 | 0.007844 | 4000.000 | Bueno | 15.68 |
| | | | 11 | 0.75 | 0.007625 | 4000.000 | | 15.25 |
| 12 | | | 0.75 | 0.007469 | 4000.000 | 14.93 | | |

6.4 Apoyo 3

Resultados del GPR

Finalmente, se realiza el análisis del último apoyo del puente Teapa 2. En este Apoyo 3, se obtuvieron la misma cantidad de radargramas que en los apoyos anteriores (Anexo B), correspondientes a las líneas con las nomenclaturas A3 L1 de 27.30 m y la A3 L2 de 27.55 m. Observemos el radargrama de la Figura 45 que corresponde a la línea A3 L2, y de la misma forma que en casi todos los radargramas que se analizaron en los apoyos anteriores es posible observar la señal hasta los casi 4.5 m de profundidad, después se identifica a los 2.7 m el nivel de agua del arroyo al momento de la medición, por debajo de este nivel hay algunas anomalías asociadas probablemente a heterogeneidades del concreto por un colado deficiente al momento de la construcción. También se identifica esa “zona de humedecimiento” presente en todos los radargramas a los 2 m, que como ya mencionamos corresponde a la infiltración del agua en el concreto resultado de las constantes variaciones del nivel del río o arroyo; a partir de los primeros 0.5 m se pueden observar anomalías con una forma de rizadura, que generalmente están asociadas a la presencia de armado metálico o varillas de acero.

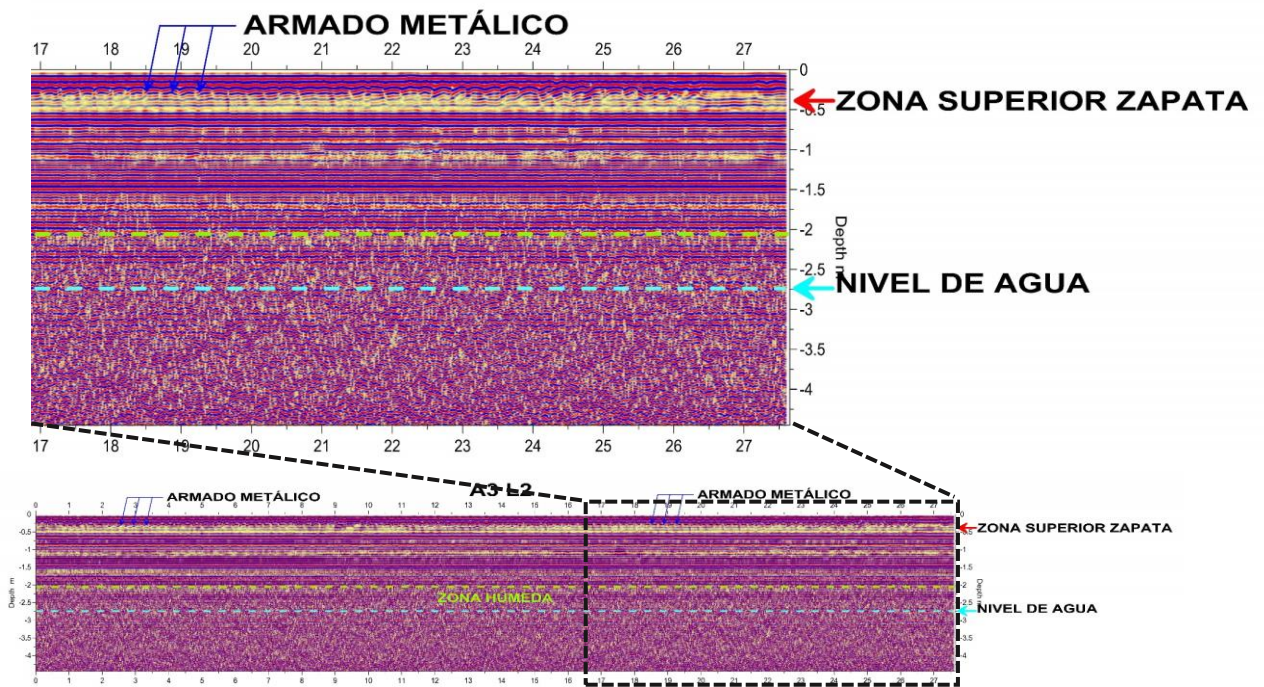


Figura 45. Radargrama correspondiente a la línea A3 L2 del Apoyo 3. Fuente: Elaboración Propia.

Resultados del Ultrasonido y el PIT

A través del radargrama anterior se pudo observar que también en el Apoyo 3 se presenta cierta continuidad en los primeros metros explorados y que de existir pilotes hubiese sido posible observar la parte superior de estos por medio del georadar; entonces se prosigue a la interpretación de los resultados del Ultrasonido y la Prueba de Integridad de Pilotes (PIT), dónde se exponen resultados muy similares a los obtenidos en los anteriores apoyos en cuanto a la persistencia de la estructura a cierta profundidad, valores de velocidad obtenidos y calidad del material.

Tabla 11. Valores determinados a través del análisis de resultados del método de Ultrasonido y PIT para el Apoyo 3. Fuente: Elaboración Propia.

| APOYO 3 | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Punto de medición PIT | A3_P43 | A3_P45 | A3_P47 | A3_P49 | A3_P50 | A3_P51 | A3_P52 | A3_P53 | A3_P54 |
| Velocidad Ultrasonido (m/s) | 4160 | 4310 | 4620 | 4640 | 4000 | 4670 | 4680 | 4530 | 4720 |
| | 4620 | 4410 | 4500 | 4520 | 4100 | 4590 | 4350 | 4140 | 4790 |
| Velocidad Ultrasonido Promedio (m/s) | 4390 | 4360 | 4560 | 4580 | 4050 | 4630 | 4515 | 4335 | 4755 |
| Velocidad asignada PIT (m/s) | 3850 | 3900 | 3800 | 3450 | 3400 | 3900 | 3900 | 3600 | 4200 |
| Clasificación del concreto (Leslie y Cheesman, 1949) | B | B | B | R | R | B | B | R | B |
| Profundidad Estimada (m) | 13.8 | 13.7 | 13.8 | 13.9 | 13.9 | 13.7 | 13.5 | 13.9 | 13.9 |

En la Tabla 11 podemos observar los valores de velocidades determinados para cada punto con el Ultrasonido y también los valores promedio asignados al PIT, que en este caso van desde los 3400 m/s a los 4200 m/s, asociados con una clasificación de concreto de “Regular” a “Bueno” según (Malhotra V. , 1985).

En la Figura 46 podemos observar uno de los reflectogramas (promedio de la respuesta de dos impactos) del Apoyo 3 correspondiente al Punto 52 (P52) de medición de Ultrasonido y PIT, de ahí la nomenclatura A3_P52. El método PIT es cualitativo, ya que se le asigna una velocidad de onda previamente definida con el Ultrasonido que en este caso fue de 3900 m/s, y por medio de esto fue posible estimar una profundidad de la estructura por medio de reflexiones asociadas al contacto de la base de la estructura que funge como cimiento y un estrato del suelo.

También al inspeccionar el reflectograma, no se observa alguna respuesta relacionada con la presencia de una pila y/o pilote, así que podemos establecer que efectivamente se puede tratar de una “gran zapata” de cimentación de alrededor de unos 13.5 metros de profundidad y conformada con un concreto “Bueno” según (Malhotra V. , 1985).

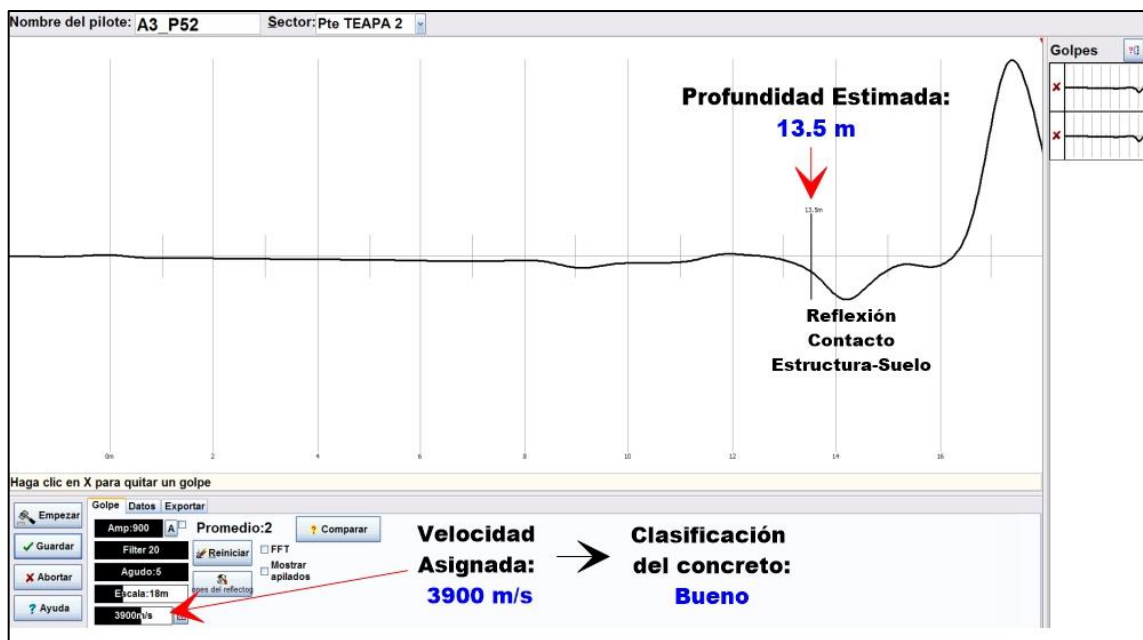


Figura 46. Registro obtenido de la prueba PIT del punto A3_P52 que corresponde al Apoyo 1 del puente.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de Sísmica de Reflexión

Por último, proseguimos a la interpretación de los resultados de las líneas de Sísmica de Reflexión para el Apoyo 3 que tienen las mismas características que las realizadas en Apoyo 1, 2A y 2B (3 tendidos colineales de 12 geófonos con una separación de 0.75 m).

Tabla 12. Resultados de la sísmica de reflexión para el Apoyo 3. Fuente: Elaboración propia.

| APOYO | Tendido | Punto de Impacto o Tiro | Geófono | Distancia entre geófonos | Tie. O. Reflex | Vel. Onda P calculada | Clasificación (Leslie y Cheesman, 2000) | Profundidad determinada |
|-------|---------|-------------------------|---------|--------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| | | | No. | (m) | (seg) | (m/s) | | (m) |
| 3 | 1 | 82 | 10 | 0.75 | 0.007594 | 3695.000 | Bueno | 14.03 |
| | | | 11 | 0.75 | 0.007438 | 3695.000 | | 13.74 |
| | | | 12 | 0.75 | 0.007188 | 3695.000 | | 13.28 |
| | 3 | 99 | 5 | 0.75 | 0.007469 | 3989.362 | Bueno | 14.89 |
| | | | 6 | 0.75 | 0.00725 | 3989.362 | | 14.46 |
| | | | 7 | 0.75 | 0.007031 | 3989.362 | | 14.02 |
| | | | 8 | 0.75 | 0.007219 | 3989.362 | | 14.39 |

En la Tabla 12 se examina el Tendido 1, con punto de impacto 82 y las trazas que corresponden a los geófonos, 10, 11, 12; y se realiza el mismo procedimiento, a partir de las distancias y los tiempos de reflexión se determina un valor de velocidad de onda P de 3695

m/s que corresponde a un concreto de “Buena” calidad y se calcularon profundidades que van desde los 13.28 m hasta los 14.03 m. Para el Tendido 3, con punto de tiro 99 se analizan las trazas de los geófonos 5, 6, 7, 8 y se obtuvo una velocidad de 3989.362 m/s asociada también a un concreto “Bueno” y las profundidades obtenidas en este Tendido están entre los 14.02 m y los 14.89 m. De nuevo podemos refrendar que cada uno de los resultados en cada método nos indican que esta es una estructura continua que funge como cimiento (zapata) y que no fue posible distinguir la existencia de algún otro elemento hasta la profundidad investigada.

7. Conclusiones y Recomendaciones

En síntesis, en torno al objetivo principal de este estudio, se estableció que:

- El orden de aplicación de los métodos geofísicos empleados resultó de vital importancia para lograr los objetivos del estudio de manera lógica y precisa. Se inició con el método de GPR con el que se esperaba definir si en los primeros metros explorados existían discontinuidades que pudieran asociarse a la presencia de pilotes o no. Posteriormente, al existir poca evidencia de la existencia de dichos elementos con este primer método, se realizaron las pruebas de Ultrasonido en puntos específicos para establecer velocidades de propagación que se asignaran al método de PIT, y con esto se pudo observar que efectivamente, la estructura presentaba cierta continuidad hasta los 13 o 14 m de “profundidad estimada” en las posibles zonas dónde debieron haberse observado pilas y/o pilotes; entonces se pudo corroborar que algunas de las anomalías presentes en los radargramas se relacionaban más con discontinuidades en el concreto debido a algún otro factor (como el agua) y que en efecto la estructura podría tratarse de una zapata de gran tamaño.

Para comprobar la existencia de una posible estructura monolítica en lugar de un conjunto de pilas y pilotes, se realizaron entonces líneas de Sísmica de Reflexión, que nos permitirían examinar de manera más detallada a cada uno de los apoyos por medio de tendidos colineales de 12 geófonos con separaciones de 0.75 m, esto considerando que el diámetro de pilas y/o pilotes que mayormente se utilizan en este tipo de estructuras van del orden de los 40 a los 80 cm de diámetro, es decir que con las características de nuestros tendidos podíamos asegurar que de haber alguno de estos elementos podríamos observarlos en nuestros sismogramas; también por medio de este método pudimos calcular velocidades de propagación más precisas del concreto y profundidades reales de 14 a 15 m, asociadas posiblemente al contacto de un estrato del suelo y la estructura de cimentación.

- Se confirmó que la cimentación no consta de pilas o pilotes, a pesar de que en un inicio se tenía la sospecha de que pudieran existir, a partir del análisis de los resultados de los métodos aplicados en cada uno de los soportes del puente no fue posible comprobar que existieran elementos con estas características.

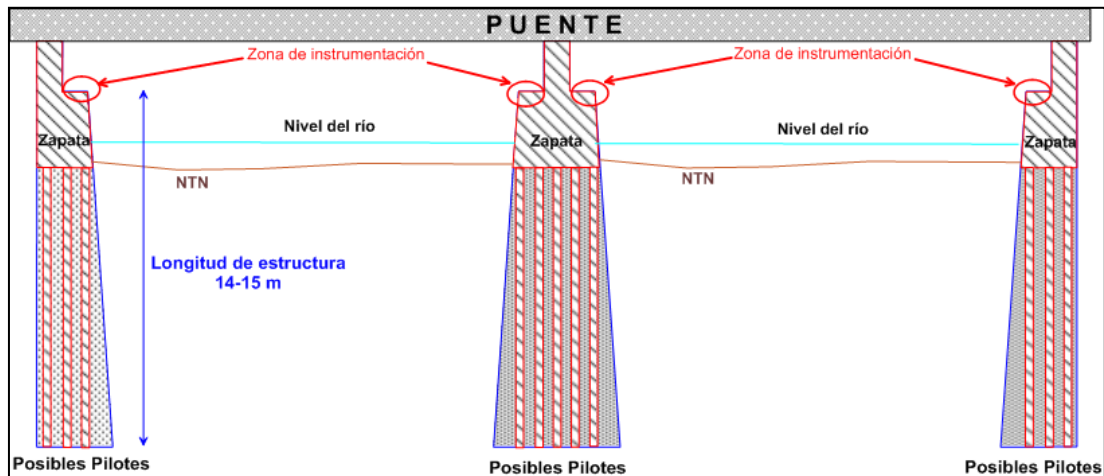


Figura 47. Caracterización final de la cimentación del Puente Teapa 2. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V., 2013).

- El diseño de un puente varía dependiendo de su función, la naturaleza del terreno en el que se construye, de los materiales disponibles, técnicas desarrolladas por la Ingeniería Estructural y de algunas consideraciones económicas. Entonces, el puente Teapa 2 fue construido con una cimentación que consiste en una “gran zapata” de unos 14 a 15 metros de profundidad (Figura 48), que resulta ser la más adecuada para fungir como base de una estructura desplantada en un tipo de suelo constituido en su mayoría por depósitos recientes, arcillas y arenas.

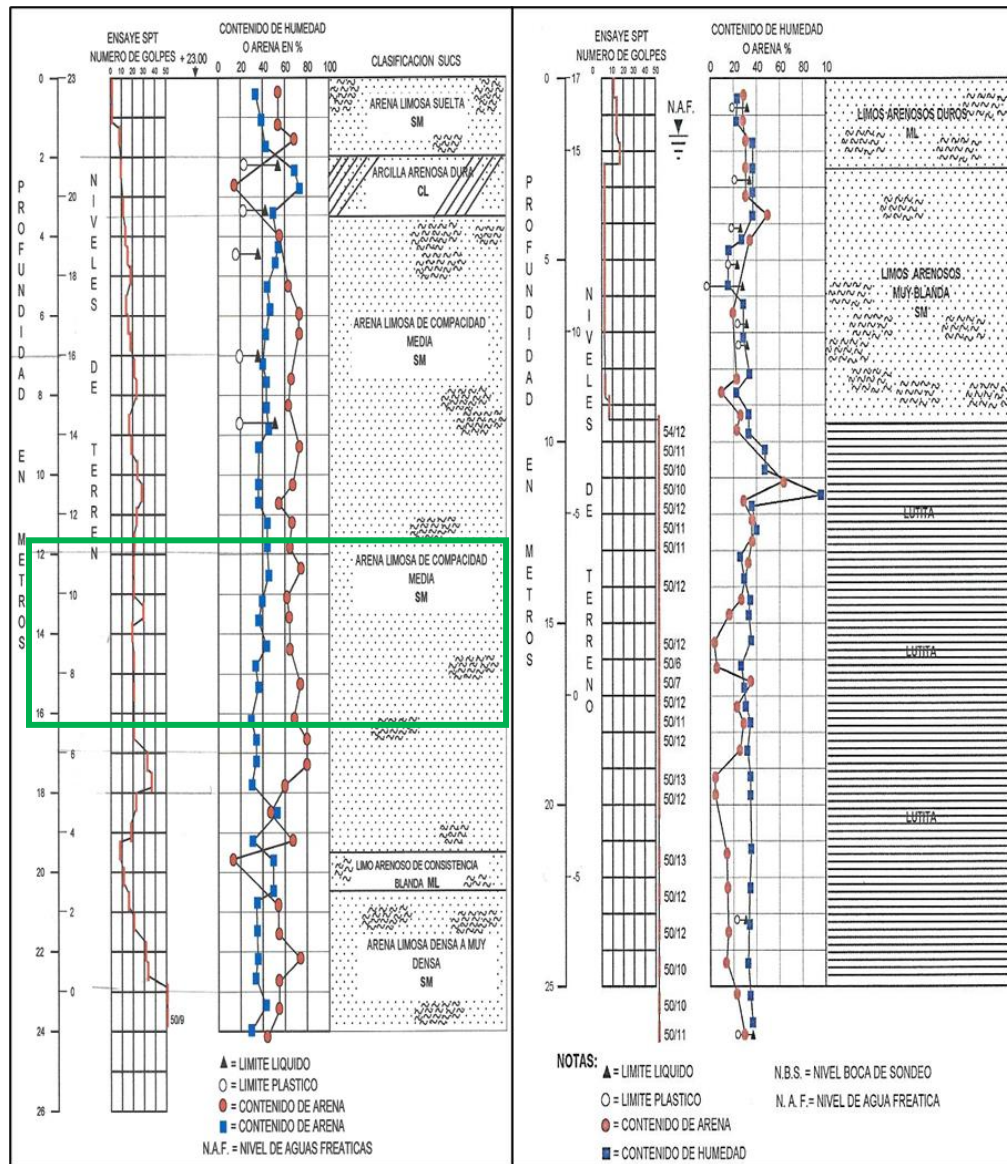


Figura 48. Sondeos realizados en las Petroquímicas Cangrejera y Morelos que muestran el perfil estratigráfico típico de la zona, en el orden de los 12 a 15 m de profundidad es posible ver un cambio de litología a una arena fina arcillosa. Fuente: (Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V, 2004).

Esto resulta ser congruente con la estratigrafía local de la zona, que nos muestra que de los 12 a los 25 m de profundidad se identifica una arena fina arcillosa, estrato profundo hasta dónde se realizan las cimentaciones y que generalmente recibe parte de la carga de las estructuras.

- En cuanto al estado del concreto que conforma a dicha estructura; con el GPR se buscaba observar la respuesta natural de un concreto homogéneo, sin embargo en los radargramas se pudieron percibir algunas discontinuidades que se relacionaban con heterogeneidades del concreto desde el momento de su colado y que quizás con el tiempo son más evidentes; y también con la presencia constante de agua del arroyo (contaminada posiblemente con residuos químicos) y esto nos indica que existe un proceso de corrosión del concreto.

Las velocidades obtenidas a partir de los métodos de Ultrasonido y Sísmica de Reflexión también nos permitieron realizar una clasificación de calidad ((Leslie & Cheesman, 1949) que variaba en forma general entre “Regular” y “Bueno”; cabe destacar que las medidas de Ultrasonido se realizaron de manera superficial y en puntos específicos, con la finalidad de asignar velocidades al PIT y que las líneas de Sísmica de Reflexión se realizaron con tendidos de geófonos con distancias menores que nos permitían examinar los apoyos de manera más eficaz, es por esto que probablemente existieron diferencias en las velocidades de propagación obtenidas para cada método, porque el material presentaba diferentes condiciones en algunas zonas de la zapata.

- Los métodos geofísicos como el GPR, el Ultrasonido, PIT y la Sísmica de Reflexión resultan herramientas útiles, rápidas y sencillas para la inspección y caracterización de estructuras civiles y para fines geotécnicos, como fue el caso de este estudio en particular en dónde dichos métodos permitieron conocer las características de la cimentación del Puente Teapa 2 y también el estado actual en el que se encuentra el concreto que la conforma.
- Los responsables de la ingeniería estructural deberán de hacer los cálculos correspondientes para determinar si con este tipo de cimentación, el puente Teapa 2 puede o no soportar el paso de la carga solicitada.

Referencias

- Abramo, D. (2011). *Impact-echo modeling and imaging techniques. Civil Engineering Master's Theses. Northeastern University, Department of Civil and Environmental. . Boston: JRis.*
- Annan, A. (2005). Ground-penetrating radar. In Near surface geophysics, Butler DK (ed). *Society of exploration geophysicists: Tulsa, Investigations in Geophysics*, 13: 357-438.
- ASTM C597-83, A. S. (1991). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.*
- ASTM D5882-07, A. S. (2007). *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations.*
- Baker, G., Jordan, T., & Pardy, J. (2007). An introduction to ground penetrating radar (GPR). *The geological society of America special papers.*, 432: 1-18.
- Briaud, J., Ballouz, M., & Nasr, G. (2002). *Defect and Length Predictions, NDT Methods. Nine Bored Piles, Deep Foundations.*
- Consejo de Recursos Minerales, C. d. (1994). *Monografía Geológico-Minera del Estado de Veracruz.* Pachuca, Hidalgo.: Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.
- Conyers, L. B. (2004). *Ground Penetrating Radar for Archaeology.* Walnut Creek, California: Altamira Press.
- Davis, A., & Dunn, C. (1974). *From theory to field experience with the non-destructive vibration testing of piles.* Proc. Instn. Civil Engineers, Part 2.
- Dobrin, M., & Savit, C. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting (4th ed.).* Mc. Graw Hill.
- Geoelec. (2017). *Productos.* Retrieved from Georadar : <https://www.geoelec.com.mx/georadar-antenas-blindadas.html>
- Harari, Z. (1996). Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *Journal of applied geophysics.*, 36: 43-52.
- Hertlein, B., & Davis, A. (2007). *Nondestructive Testing of Deep Foundations.* Hoboken, USA: John Wiley & Sons.
- IMCYC, I. M. (2004). *Conceptos básicos del concreto.* Ciudad de México: IMCYC.
- INIFIED. (2015). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones.* Retrieved from Normatividad e Investigación: <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/742.htm>

- Jiracek, G. R. (1990). Near-surface and Topographic distortions in electromagnetic induction. *Surveys in Geophysics*, 163-203.
- Leslie, J., & Cheesman, W. (1949). An Ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structures. *American Concrete Institute Journal*. Vol 21. , 17-36.
- M. Jol, H. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science, Oxford.
- Malhotra, V. (1985). *Nondestructive methods for testing concrete*. Ottawa, Canadá: Department of Energy.
- Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. ASTM International. Washington: CRC Press.
- Martínez Gutiérrez, C., & Weppen , Q. (2005). *Serie Fascículos Sismos*. . Ciudad de México: Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED.
- Orellana, E. (1982). *Prospección Geolétrica en corriente continua*. Madrid, España: Biblioteca Técnica Philips, PARANINFO.
- Pérez, V. (2001). *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Cataluña, España.: Depto. de Ingeniería de Terreno, Cartografía y Geofísica. Univ. Politécnica de Cataluña.
- Pile Echo Tester, PET. (n.d.). *Software*. Retrieved from https://piletest.com/uc_login.asp.
- RAMAC GroundVision. (2009). *Software Manual*. Skolgatan, Suecia: MALA Geoscience.
- Ramac Groundvision, M. G. (2011). *Software Versión 1.4.2*.
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental Geophysics*. Garsington Road, Oxford: Wiley-Blackwell.
- Romero, J. (2016). *Pruebas de Integridad en pilas mediante sísmica de reflexión*. Puebla, Puebla.: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Samman, M., & O'neil, M. (1997). The Reliability of Sonic Testing of Drilled Shafts. *Concrete Engineering y Sustainable Structures*, 49-54.
- Sergben, Ingeniería del Subsuelo S. A. de C. V. (2013). *Estudio Geofísico en Puente Teapa 2*. Coatzacoalcos, Veracruz.
- Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V. (2004). *Sondeos geotécnicos en Cangrejera y Morelos*. Coatzacoalcos, Veracruz.
- Sergben, Ingeniería del Subsuelo S.A de C.V. (2010). *Aplicación de georadar en un estacionamiento para caracterizar la cimentación*. Ciudad de México.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. (1988). *XIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos: Memorias Tomo I*. Monterrey, N.L.

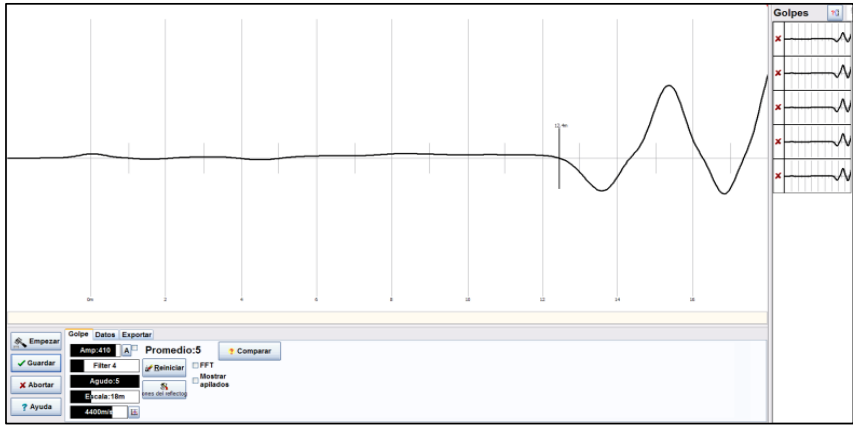
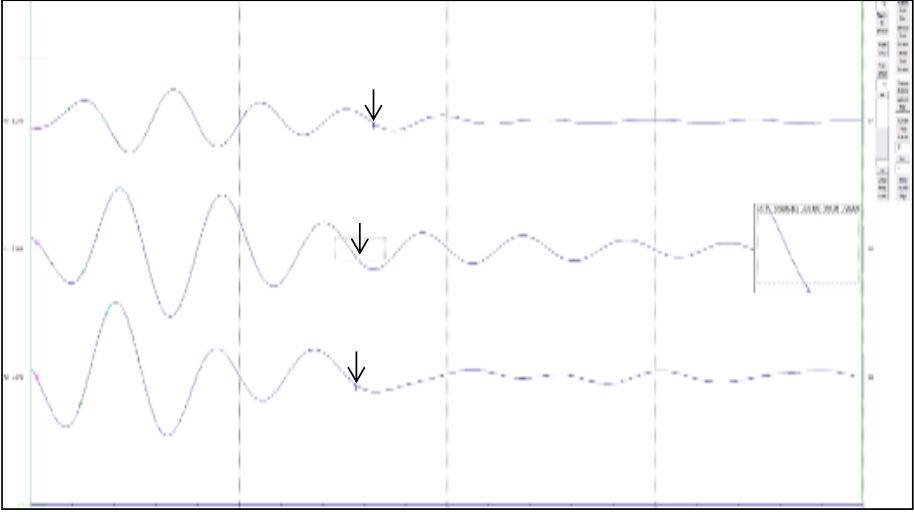
Stein, S., & Wysession, M. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Blackwell Publishing.

Tom Time, G. L. (2010). *Software (SIPwin) Versión 2.76*. Rimrock Geophysics.

User Manual PET, P. E. (2013). *User Manual*. Retrieved from https://www.piletest.com/PET_User_Manual/#title_11_softwareSetup&as_qdr=y15

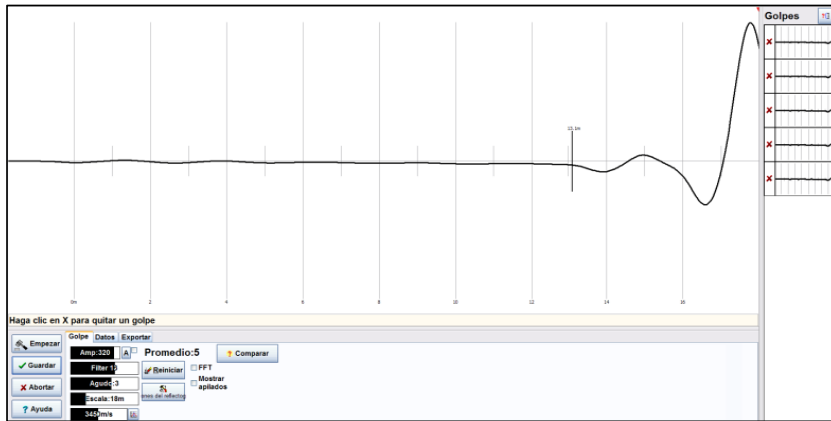
ANEXO A

Ultrasonido, PIT y Sísmica de Reflexión.

| APOYO 1 | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| Ultrasonido y Clasificación del concreto | | PIT | |
| V_p (m/s) | <i>(Leslie y Cheesman, 2000)</i> | Profundidad (m) | |
| 4400 | Bueno | 12.4 | |
| Reflectograma | | | |
|  | | | |
| Sísmica de Reflexión | | | |
| Tendido:1 | Tiro: 1 | Geófonos: 10,11,12 | |
| d (m) | V_p (m/s) | Profundidad (m) | Clasificación <i>(Leslie y Cheesman, 2000)</i> |
| 0.75 | 3694.581 | 14.43 | Bueno |
| Sismograma | | | |
|  | | | |

| APOYO 1 | | |
|------------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Ultrasonido y Clasificación del concreto | | PIT |
| V_p (m/s) | (Leslie y Cheesman, 2000) | Profundidad (m) |
| 3450 | Regular | 13.1 |

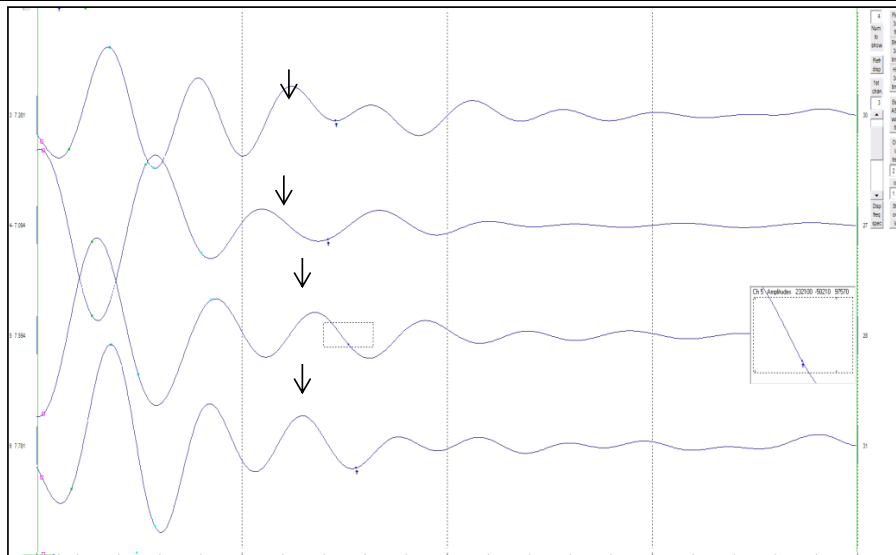
Reflectograma

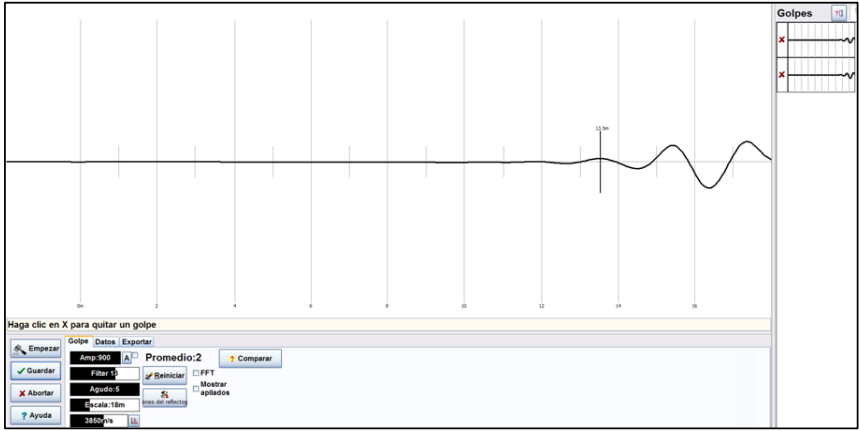
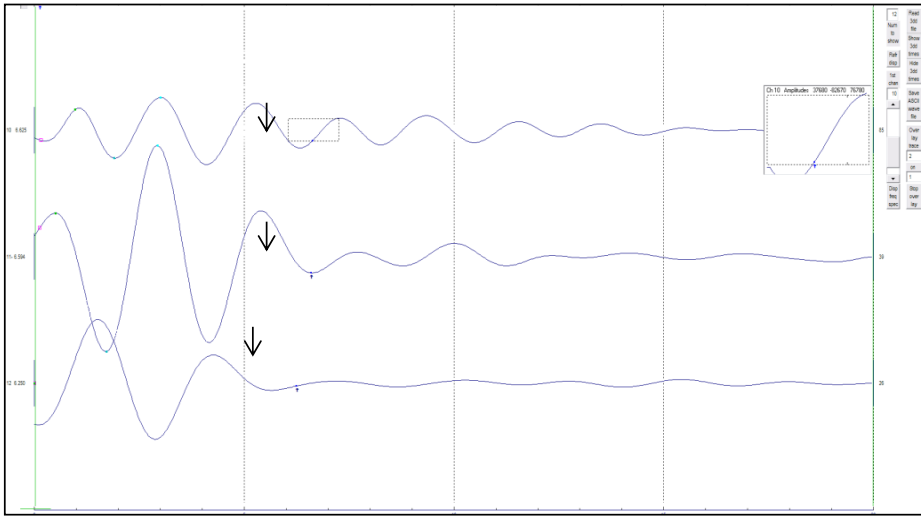


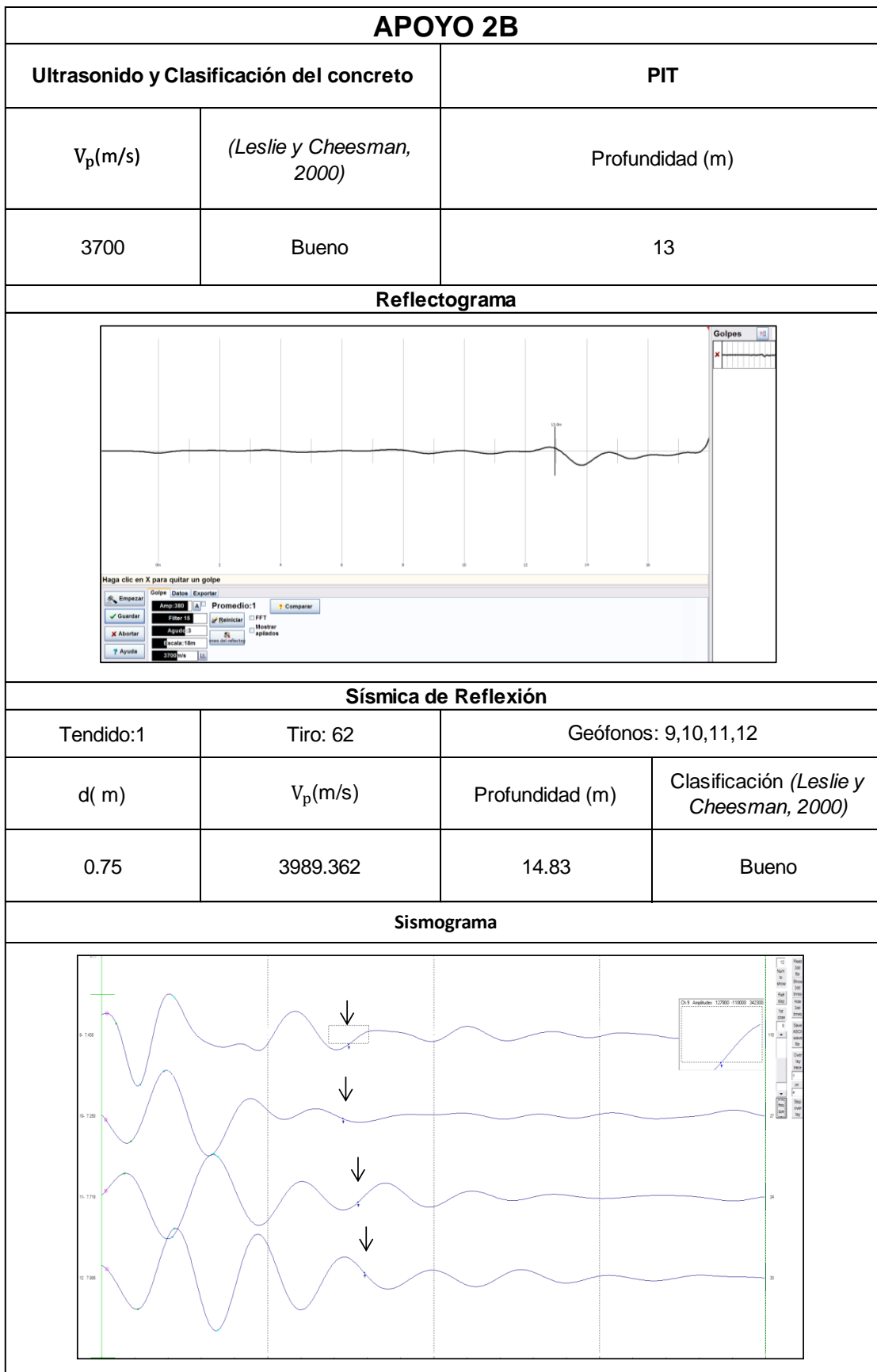
Sísmica de Reflexión

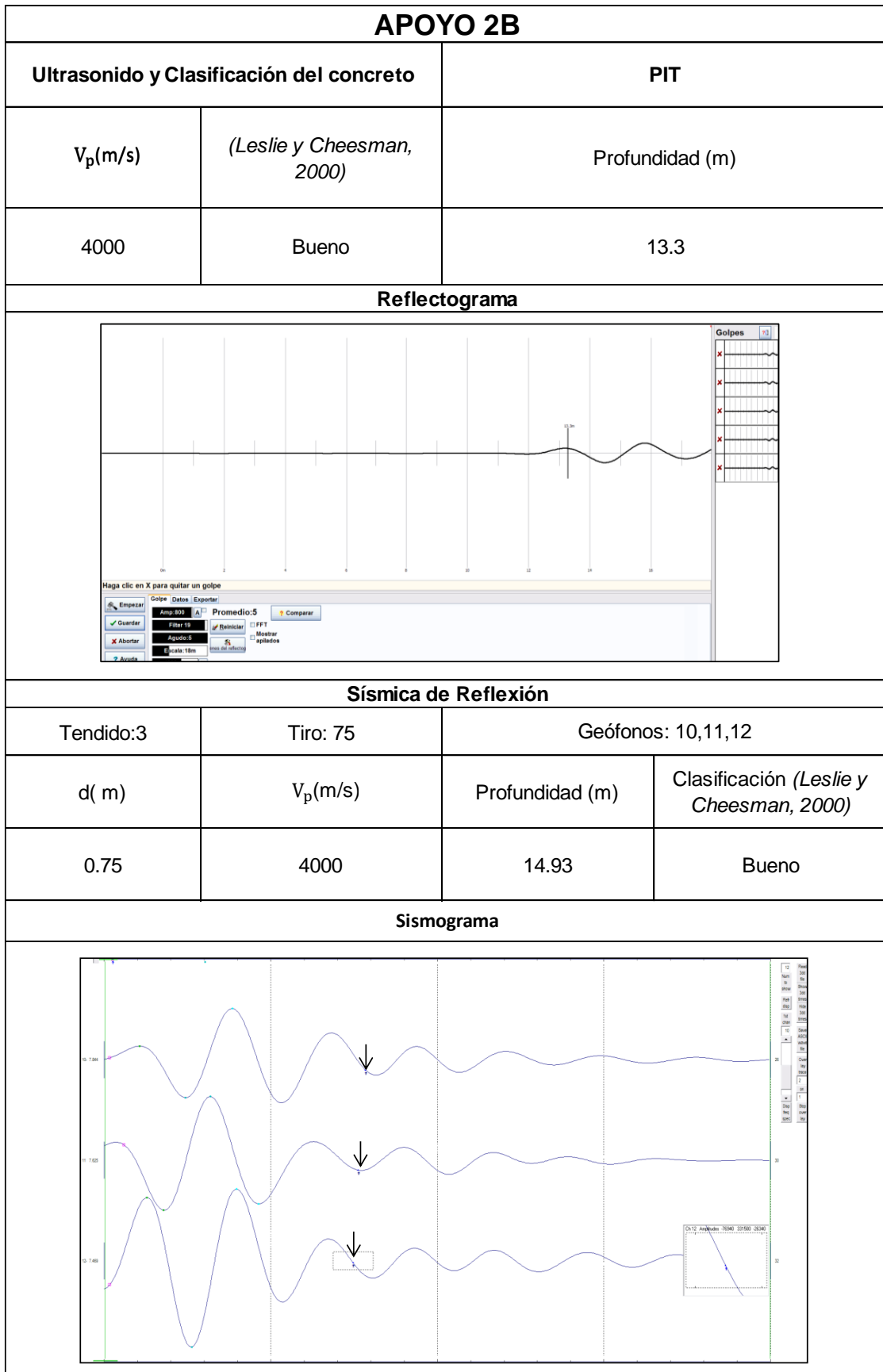
| | | | |
|-----------|-------------|-------------------|-----------------------------------------|
| Tendido:3 | Tiro: 35 | Geófonos: 3,4,5,6 | |
| d (m) | V_p (m/s) | Profundidad (m) | Clasificación (Leslie y Cheesman, 2000) |
| 0.75 | 4010.695 | 14.6 | Bueno |

Sismograma



| APOYO 2A | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------------------|
| Ultrasonido y Clasificación del concreto | | PIT | |
| V_p (m/s) | (Leslie y Cheesman, 2000) | Profundidad (m) | |
| 3850 | Bueno | 13.5 | |
| Reflectograma | | | |
|  | | | |
| Sísmica de Reflexión | | | |
| Tendido: 1 | Tiro: 40 | Geófonos: 10,11,12 | |
| d (m) | V_p (m/s) | Profundidad (m) | Clasificación (Leslie y Cheesman, 2000) |
| 0.75 | 4000 | 13.24 | Bueno |
| Sismograma | | | |
|  | | | |

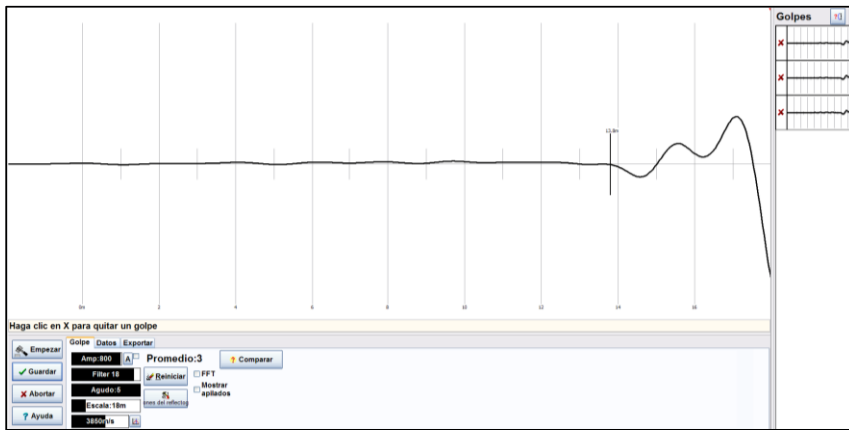




APOYO 3

| | | |
|-------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Ultrasonido y Clasificación del concreto | | PIT |
| V_p (m/s) | <i>(Leslie y Cheesman, 2000)</i> | Profundidad (m) |
| 3850 | Bueno | 13.8 |

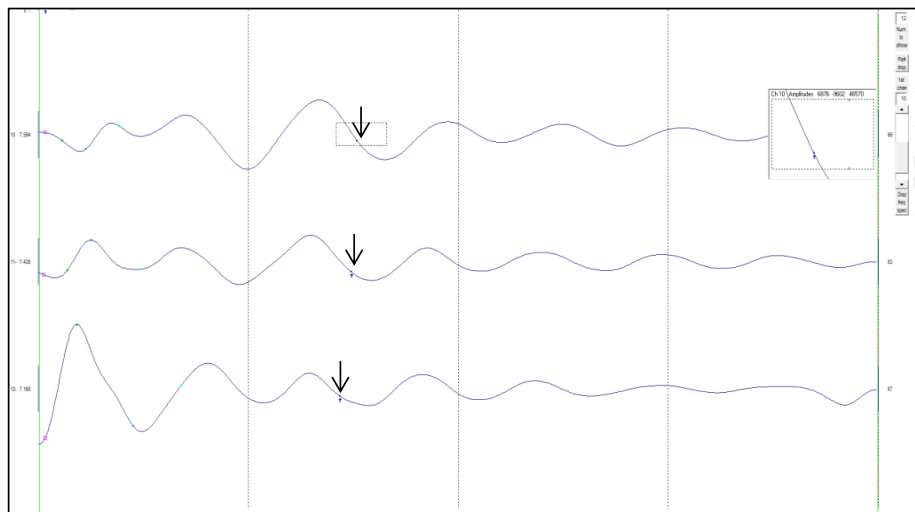
Reflectograma



Sísmica de Reflexión

| | | | |
|-----------|-------------|--------------------|------------------------------------------------|
| Tendido:1 | Tiro: 82 | Geófonos: 10,11,12 | |
| d (m) | V_p (m/s) | Profundidad (m) | Clasificación <i>(Leslie y Cheesman, 2000)</i> |
| 0.75 | 3695 | 14.03 | Bueno |

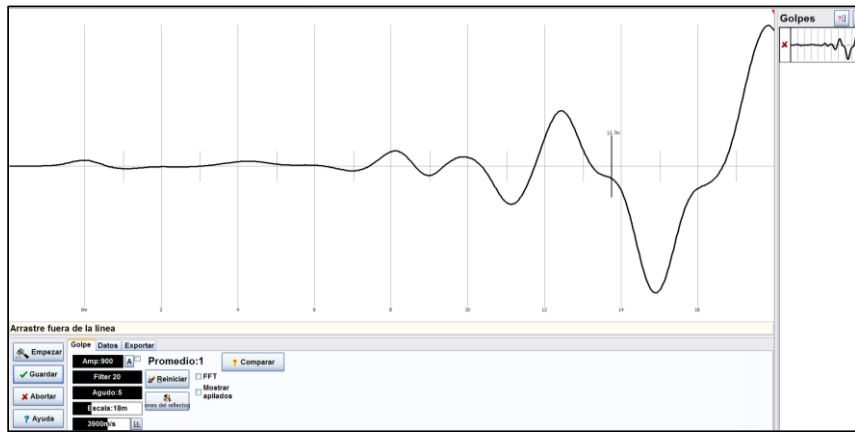
Sismograma



APOYO 3

| | | |
|-------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Ultrasonido y Clasificación del concreto | | PIT |
| V_p (m/s) | <i>(Leslie y Cheesman, 2000)</i> | Profundidad (m) |
| 3900 | Bueno | 13.7 |

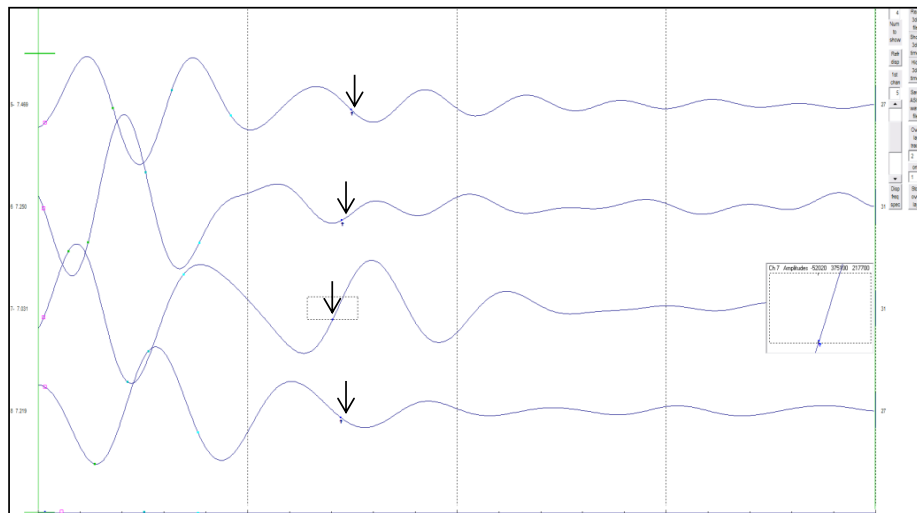
Reflectograma



Sísmica de Reflexión

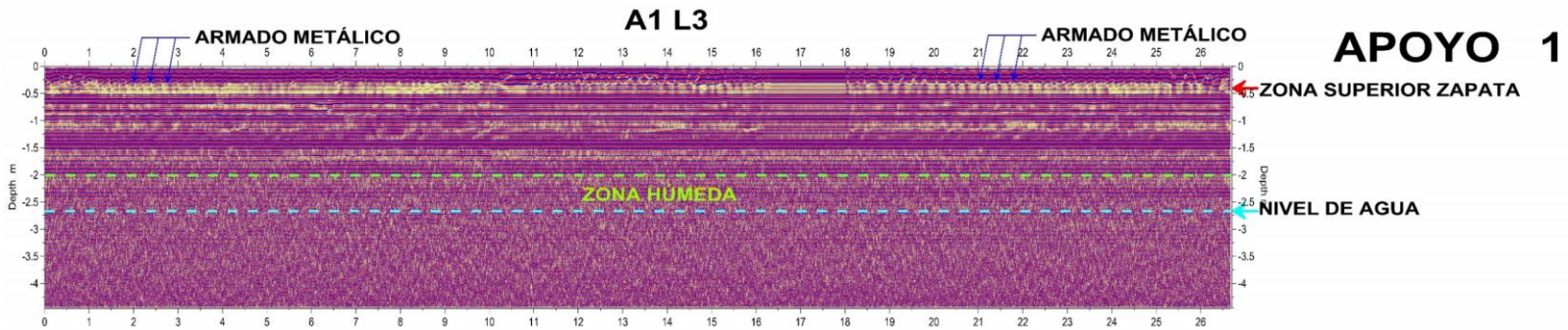
| | | | |
|-----------|-------------|-------------------|------------------------------------------------|
| Tendido:3 | Tiro: 99 | Geófonos: 5,6,7,8 | |
| d(m) | V_p (m/s) | Profundidad (m) | Clasificación <i>(Leslie y Cheesman, 2000)</i> |
| 0.75 | 3989.362 | 14.39 | Bueno |

Sismograma

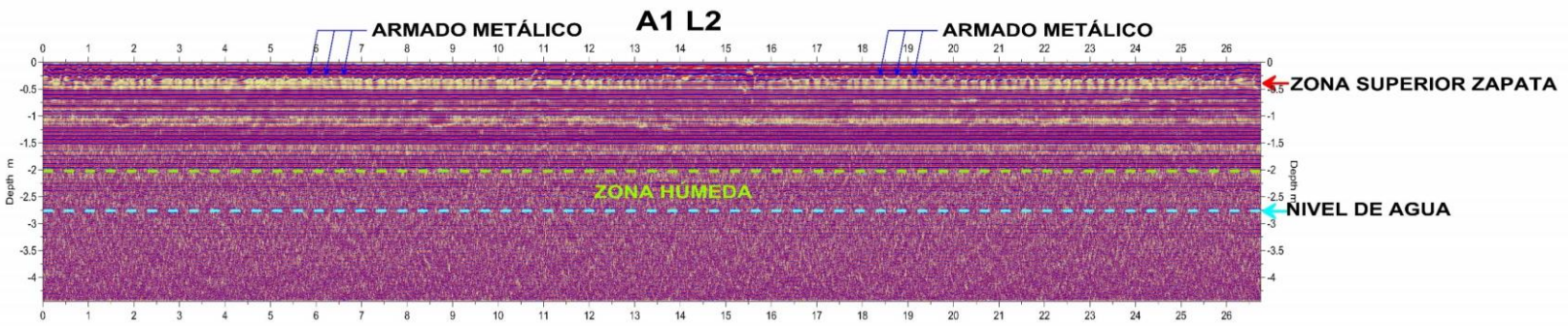


ANEXO B

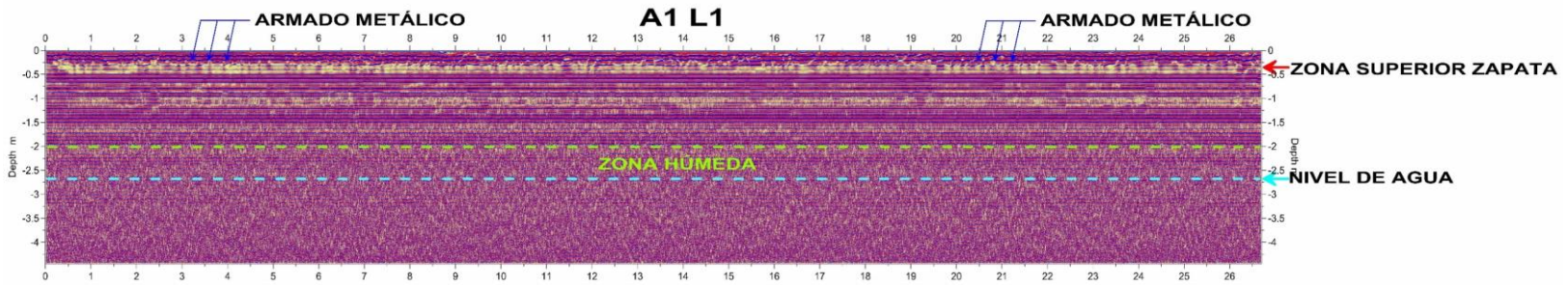
Radargramas



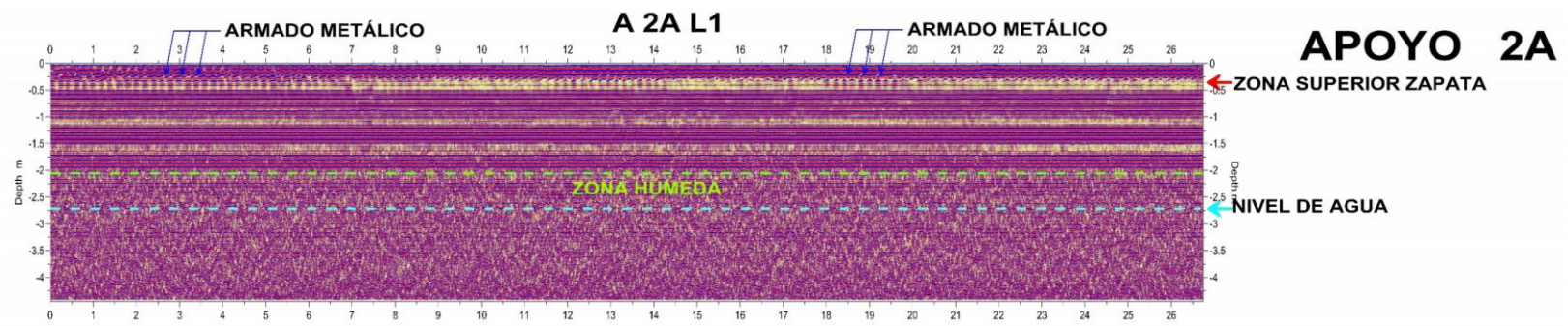
Radargrama correspondiente a la línea A1 L3 del Apoyo 1.



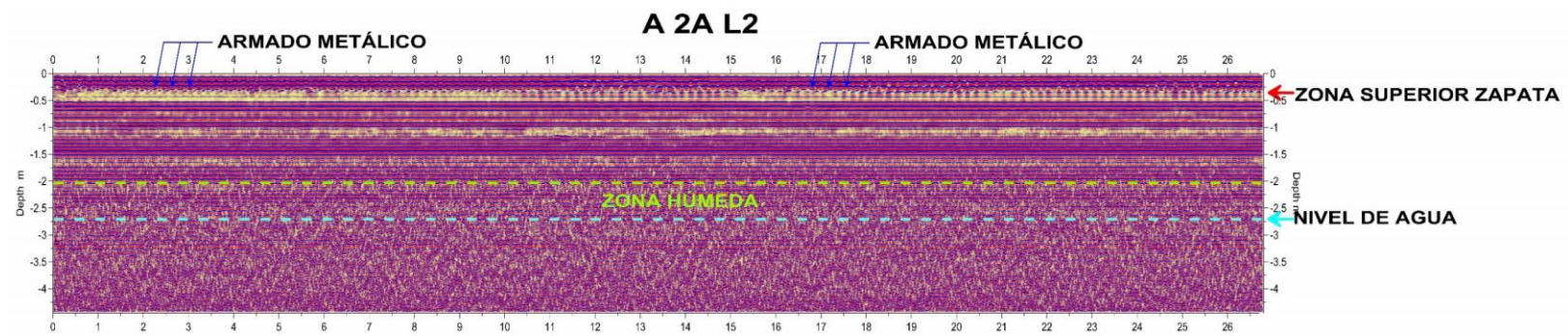
Radargrama correspondiente a la línea A1 L2 del Apoyo 1.



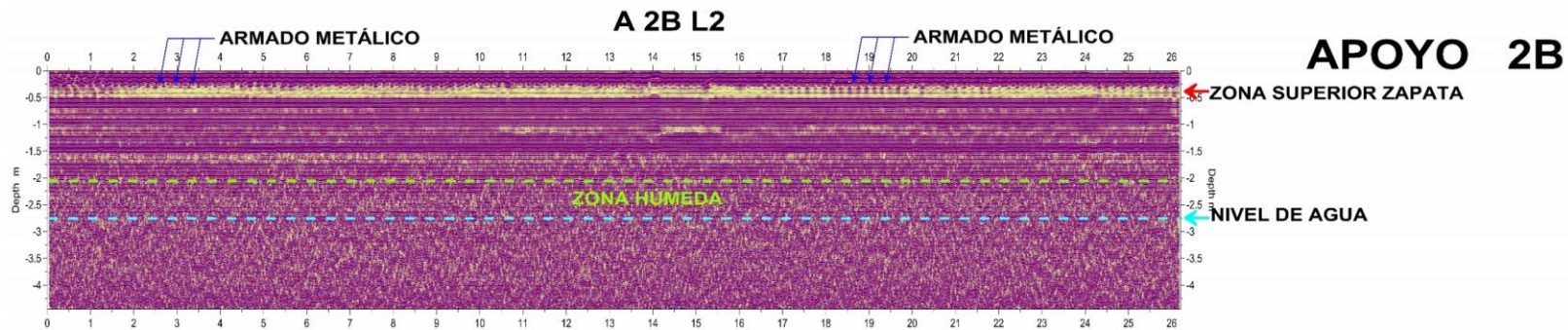
Radargrama correspondiente a la línea A1 L1 del Apoyo 1.



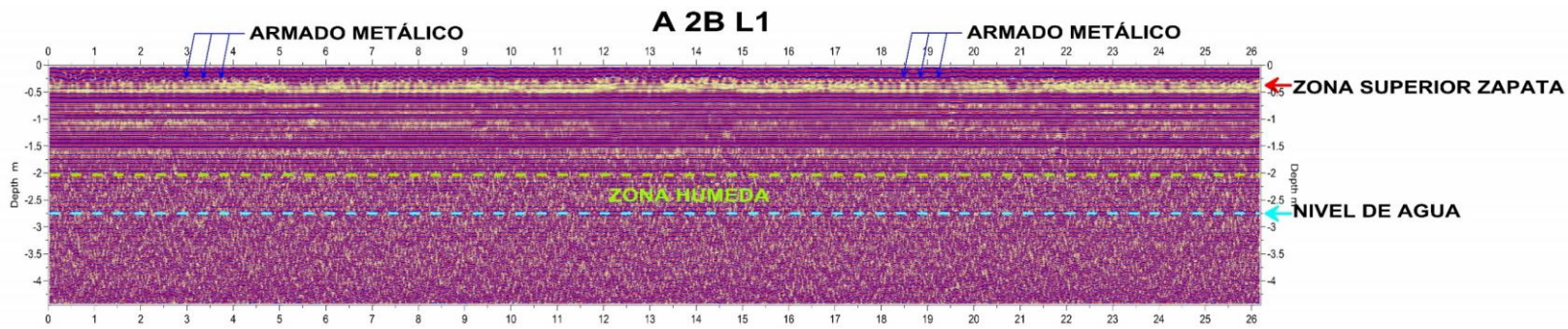
Radargrama correspondiente a la línea A2A L1 del Apoyo 2A.



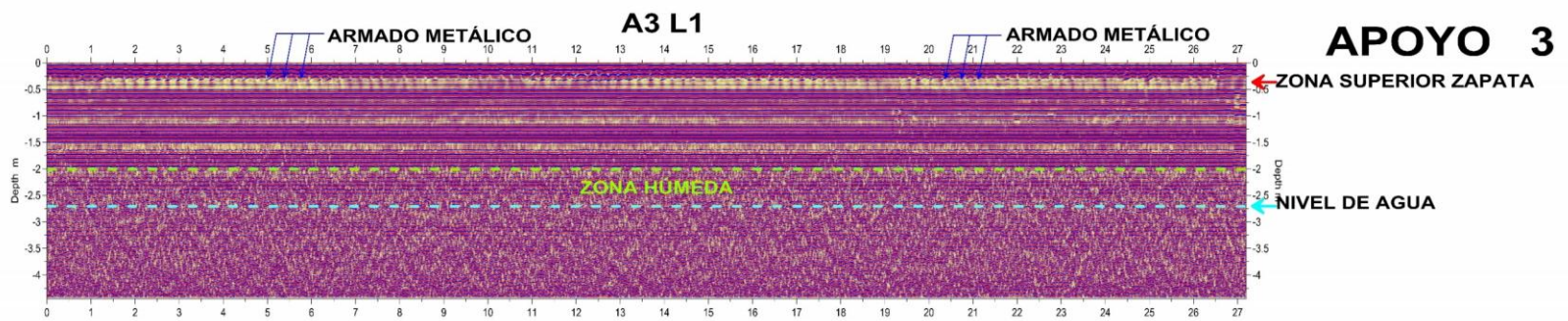
Radargrama correspondiente a la línea A2A L2 del Apoyo 2A.



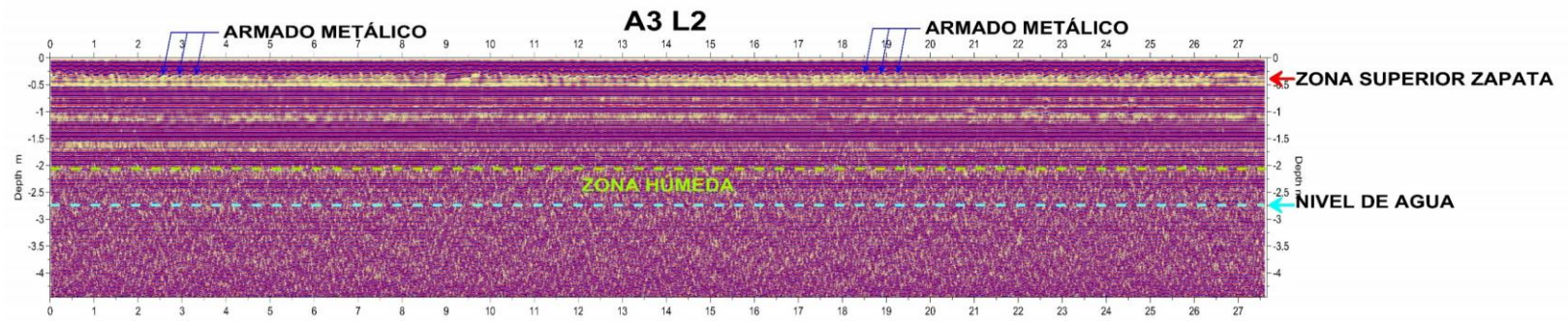
Radargrama correspondiente a la línea A2BL2 del Apoyo 2B.



Radargrama correspondiente a la línea A2B L1 del Apoyo 2B.



Radargrama correspondiente a la línea A3L1 del Apoyo 3.



Radargrama correspondiente a la línea A3L2 del Apoyo 3.